



**ANÁLISIS COMPARATIVO Y TECNICO-ECONOMICO DEL ÍNDICE DE FALLAS  
EN BOMBAS PCP CON VARILLA CONVENCIONAL VS COROD EN EL CAMPO  
SANTA CLARA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES HUILA-  
TOLIMA, ECOPETROL S.A.**

**ANGEL DURAN PEÑA**

**HERNAN FELIPE GASCA FALLA**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
NEIVA  
2013**

**ANÁLISIS COMPARATIVO Y TECNICO-ECONOMICO DEL ÍNDICE DE FALLAS  
EN BOMBAS PCP CON VARILLA CONVENCIONAL VS COROD EN EL CAMPO  
SANTA CLARA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES HUILA-  
TOLIMA, ECOPETROL S.A.**

**ANGEL DURAN PEÑA  
HERNAN FELIPE GASCA FALLA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero  
de Petróleos**

**Director:  
ERVIN ARANDA ARANDA  
DOCENTE UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**CODIRECTOR:  
MARIO MOLANO  
INGENIERO DE PRODUCCIÓN LÍDER PCP**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETROLEÓS  
NEIVA  
2013**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Neiva, Septiembre 26 de 2013

## **DEDICATORIA**

Gracias a mis padres por su apoyo incondicional y por guiarme en este largo trayecto que es la vida.

**Hernán Felipe Gasca Falla.**

A mi madre, quien es toda mi vida. A mi hermana, quien amo con el alma. A mi padre, hermano y abuelo, mis seres amados allá en el cielo.

**Angel Duran Peña.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

Al ing. De Petróleos y docente Ervin Aranda por su apoyo y constante colaboración en el desarrollo de nuestro proyecto.

Al ing. Mario Molano, ingeniero de producción senior de Ecopetrol, por su disposición y atención a la hora de consultarle diferentes aspectos de nuestro proyecto de grado.

A la ing. Daniela Rengifo y al personal de TDA por su colaboración y apoyo constante en el desarrollo de nuestro proyecto.

Al personal de Varisur, por su gran colaboración.

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCION	16
1. MARCO TEORICO	17
1.1 RESEÑA HISTORICA	17
1.2 GENERALIDADES TÉCNICAS	18
1.2.1 Descripción de la bomba	18
1.2.2 Ventajas	19
1.2.3 Limitaciones	21
1.3 TIPOS DE INSTALACION	21
1.3.1 Instalación convencional	21
1.3.2 Instalación Insertable	22
1.4 EQUIPO DE SUPERFICIE	22
1.4.1 Variador de frecuencia	22
1.4.2 Cabezal	23
1.4.3 Motor	25
1.4.4 Sistema de transmisión	26
1.5 EQUIPO DE SUBSUELO	26
1.5.1 Tubería de producción	26
1.5.2 Ancla Antitorque	26
1.5.3 Pin de paro	28
1.5.4 Niple Intermedio	28
1.5.5 Estator PCP	29
1.5.6 Rotor	30
1.5.7 Sarta de Varillas	31

1.5.7.1 Varilla Convencional	31
1.5.7.2 Varilla continua	31
1.5.7.3 Varilla combinada	33
1.5.8 Pony Rod	33
1.5.9 Cuello de ganso	34
1.5.10 Pin End	34
1.5.11 Vástago	35
1.6 ACCESORIOS	35
1.6.1 Centralizador	35
1.6.2 Madrina o Trozo de maniobra de 12 pies	36
1.6.3 Ancla de torsión	36
1.6.4 Niples asiento	37
1.6.6 Tubo filtro	37
1.6.7 Shear coupling	37
1.6.8 Subcoupling	38
1.7 ELASTOMERO	39
1.8 DISEÑO PARA SISTEMAS PCP	39
1.8.2 Geometría de la bomba	40
1.8.3 Principios básicos	40
1.8.4 Levantamiento neto requerido (Presión)	41
1.9 GENERALIDADES DEL CAMPO SANTA CLARA	42
2. COMPILACION Y CLASIFICACION DE DATOS DE FALLA DE VARILLA CONVENCIONAL, CONTINUA Y COMBINADA	44
2.1 OBTENCION DE LA INFORMACION	44



3. ANALISIS COMPARATIVO Y TECNICO DEL INDICE DE FALLAS DE VARILLA ASOCIADAS A SISTEMAS DE PCP DEL CAMPO SANTA CLARA	49
3.1 ANÁLISIS DE LAS AFECTACIONES DE LA SARTA DE VARILLAS Y SUS COMPONENTES	61
3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EVENTOS ASOCIADOS A LOS POZOS PCP DEL CAMPO SANTA CLARA	66
3.3 INDICE DE FALLA DE LAS VARILLAS A PARTIR DE LOS EVENTOS DE FALLA	70
3.4 ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE PROPICIAN LAS AFECTACIONES Y FALLAS MÁS COMUNES DE LAS VARILLAS DE LOS POZOS PCP DEL CAMPO SANTA CLARA	71
3.4.1 Análisis de las condiciones corrosivas en los Pozos PCP del campo Santa Clara	72
3.4.2 Análisis de las condiciones de ruptura de las varillas en los pozos de SLA PCP en el Campo Santa Clara	75
4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS FALLAS DE VARILLA	78
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFIA	90
ANEXOS	91

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de producción del campo Santa Clara	46
Tabla 2. Tipo y diámetro de las varillas.	49
Tabla 3. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-01	51
Tabla 4. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-02	52
Tabla 5. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-5S	54
Tabla 6. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-6S	56
Tabla 7. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-8S	57
Tabla 8. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-9S	57
Tabla 9. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-10S	58
Tabla 10. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-11	58
Tabla 11. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-11S	59
Tabla 12 Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-14	60
Tabla 13. Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-15	61
Tabla 14. Afectaciones en pozos Santa Clara.	62
Tabla 15. Pozos y ocurrencia de evento por cada pozo.	68
Tabla 16. Tipo de sarta, tipo de evento y Número total de eventos por varilla.	69
Tabla 17. Índice de falla de los pozos PCP en el campo Santa Clara.	71
Tabla 18. Composición de fluidos del campo Santa Clara.	74
Tabla 19. Datos de Run Life, fecha de cambio de SLA, fecha de evento de falla	79
Tabla 20. Tipo de varilla, diámetro y precio comercial.	82
Tabla 21. Costo del equipo	83
Tabla 22. Producción diferida	84
Tabla 23 Costos totales de las afectaciones y eventos de varillas.	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variador de frecuencia	23
Figura 2. Cabezal	24
Figura 3. Motor Eléctrico de superficie usado en el sistema PCP.	25
Figura 4. Ancla antitorque (Modelo Excalibre)	27
Figura 5. Vista superior de un pin de paro	28
Figura 6. Estator	29
Figura 7. Rotor	30
Figura 8. Sarta de varilla continua en carrete, campo Casabe.	32
Figura 9. Pony Rod. Instalaciones TDA	33
Figura 10. Pin end. Instalaciones TDA	34
Figura 11. Centralizador de material de plástico. Instalaciones TDA.	35
Figura 12. Shear Coupling. Instalaciones TDA	37
Figura 13. Subcoupling de 1" a 7/8". Instalaciones de TDA.	38
Figura 14. Elastómero	39
Figura 15. Geometría del conjunto estator rotor.	40
Figura 16. Excentricidad.	41
Figura 17. Archivo formato Excel con reportes de operación de los 13 pozos funcionando con PCP en el campo Santa Clara.	45
Figura 18. Acople afectado por corrosión por CO <sub>2</sub>	73
Figura 19. Corrosión por CO <sub>2</sub>	73
Figura 20. Grafico dog leg vs Profundidad, Pozo 14.	77

## LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1. Producción pozos PCP del campo Santa Clara.	47
Gráfico 2. Porcentajes del tipo de Varilla para el campo Santa Clara	50
Gráfico 3. Afectaciones de las varillas para el pozo SC-02	53
Gráfico 4. Afectaciones de las varillas para el pozo SC-5S	55
Gráfico 5. Casos de afectaciones para cada configuración de sarta de varilla	63
Gráfico 6. Casos totales con respecto a los tipos de afectación	65
Gráfico 7. Porcentaje de Afectaciones	64
Gráfico 8. Eventos totales de falla de varilla	68
Gráfico 9. Evento de falla de varilla para cada tipo de sarta de varillas	69
Gráfico 10. Run life para cada pozo.	80

## RESUMEN

Las varillas que trabajan con el sistema PCP (Por sus siglas en ingles) o también conocido como Bombeo por Cavidades Progresivas (BCP) son una parte esencial para el funcionamiento de dicho sistema. Estas varillas en algunos campos están sometidas a condiciones de operación particulares como los fluidos corrosivos, configuraciones de geometría de pozo donde los esfuerzos en la sarta pueden ser extremos y entre muchas otras condiciones de operación que pueden generar problemas en el desempeño de las varillas en los diferentes pozos. De esta manera es necesaria una búsqueda de la optimización en los diseños de levantamiento PCP a la hora de su instalación y durante su vida operativa para prevenir los daños de la sarta de varillas y sus componentes, esto con el fin de mejorar el desempeño operativo de las varillas de bombeo en pozos con sistemas PCP.

En los pozos de PCP del campo Santa Clara de la Superintendencia de operaciones del Huila (SOH), múltiples fallas asociadas al SLA (Sistema de levantamiento artificial) se hacen presentes afectando la producción del campo con Tiempos No Productivos (NPT por sus siglas en inglés) que afectan el desempeño del campo en términos de producción con sus respectivas pérdidas económicas. Para Ecopetrol S.A es de gran importancia identificar específicamente las condiciones que propician que las varillas de PCP fallen en su operación para así mismo buscar una optimización del SLA de PCP y solucionar o disminuir las fallas asociadas a dicho sistema. Por esta importante razón se empezó con una compilación de las fallas de las varillas en este campo con la ayuda de la información obtenida de los reportes de operación de los 13 pozos de Santa Clara que funcionan con sistema PCP, y luego de recopilada esta información se dio comienzo al desarrollo del presente proyecto.

De los reportes se sustrajeron las afectaciones y eventos de las varillas para poder identificar, clasificar y posteriormente analizar sus posibles causas y eventos para buscar las variables que más influenciaron la presencia de fallas en los pozos y también para comparar el desempeño de los tipos de varillas: Convencional, continua y combinada.

Posteriormente al tener debidamente identificados, clasificados y analizados todos los datos que agrupaban las afectaciones y eventos se calculó el índice de falla, que corresponde a los servicios realizados en los pozos en un periodo de tiempo de un año y cuyo valor debe tender a cero. Posteriormente se prosiguió a efectuar el análisis económico de los costos generados por los eventos presentados en los pozos. Con esta información se procedió a identificar los pozos que más generaban pérdidas y el tipo de configuración de sarta que incurrió en menos pérdidas económicas. Seguidamente se ordenaron en tablas y gráficos estas variables económicas de manera concisa y ordenada. Concluido esto se realizaron las respectivas conclusiones y recomendaciones del análisis técnico, comparativo y económico.

## ABSTRACT

Rods working with PCP (Progressing Cavity Pumps) are an essential part from this ALS (Artificial Lift System). Those rods in some fields are working under particular operational conditions as corrosive fluids, well geometry conditions where the stresses on the rod string may be extreme, and many other operation conditions which could lead to problems on the rod string performance inside the wells. Therefore an optimization searching of the ALS form PCP when installation is carried out and develop the prevention methods to avoid damages on the rod string and its components deserves to be carried out in order to optimize the operative performance of the rod pump in PCP wells.

In the PCP wells from SOH Santa Clara field many SLA failures are present affecting the field production with NPT (Non productive time) which affects the field performance in terms of production along with its economic losses. For Ecopetrol S.A is very important to identify specifically the conditions that lead to the rods to fail in its operation and so that find an ALS optimization. For this important reason a rod failure compilation was the started in this field using the information supplied inside the operation reports from the 13 Santa Clara wells and therefore developing this current project.

From the reports the damages and the events information were subtracted to identify, classify and then analyze the damages and events causes to find the variables that considerably affected the wells and also to compare the rod type performance: Conventional, co-rod and combined.

Afterwards when the damages and events data were identified, classified and analyzed damages and events cost analysis were carried on to identify some variables like: Wells with the most significant economic losses, the string configuration with the minimum economic losses, etc. After concluding this,

conclusions were proposed from the technical, economical and comparative analyses.



## INTRODUCCIÓN

El sistema de levantamiento PCP se puede considerar como uno de los métodos de levantamiento de mayor aceptación en el mercado en los últimos años, evidenciándose esto en los crecientes casos de conversión de sistemas de bombeo mecánico a dicho sistema en los campos del país y al aumento del número de pozos con este SLA. El hecho de estar conformado por un equipo de superficie relativamente pequeño y de bajo costo, su fácil instalación y posterior operación, su capacidad en términos de eficiencia volumétrica y de potencia y la adaptabilidad a diferentes tipos de fluidos. Todas estas características hacen de este sistema una opción eficiente para la producción de hidrocarburos.

El campo Santa Clara posee 27 pozos de los cuales 13 funcionan con PCP, en estos 13 pozos se buscará identificar las fallas específicas de la varilla de tipo convencional, continua y combinada a través de la revisión de los reportes del programa Open Wells y el soporte adicional de reportes de operación suministrados por la empresa Varisur la cuál es una compañía huilense que presta servicios a Ecopetrol S.A. Con la información obtenida por medio del software y con los reportes de operación, se dará inicio a los posteriores análisis tanto técnicos como económicos inherentes al índice de falla de los dos tipos de varilla. Dichos análisis serán llevados a cabo con gráficos estadísticos y tablas para una mejor organización y visualización de la información necesaria para la población de los 13 pozos del Campo Santa Clara.

El éxito de este estudio es brindar a las empresas involucradas bien sea en la operación como en los servicios prestados, una base de datos y graficas útiles para tomar acciones correctivas y preventivas para futuras instalaciones e intervenciones de los pozos con sistema PCP del campo Santa Clara.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 RESEÑA HISTÓRICA

El precursor de este sistema de bombeo fue el francés René Moineau quien a finales de los años 20 del siglo pasado desarrolló una serie de conceptos referente a bombas helicoidales. Una de ellas tomó el nombre de Bombeo por Cavidades Progresivas (BCP) o PCP por sus siglas en ingles, nombre por el cual hoy se conoce a este tipo de sistema de levantamiento.

Posteriormente en los años 30 este concepto fue utilizado para aplicaciones industriales. En 1938, René Moineau vendió su patente a Mono y R&M (USA). Veinte años después los primeros modelos de PCP fueron desarrollados para aplicaciones de perforación de pozos.

En los 80's las PCP se empezaron a utilizar en aplicaciones de producción de crudo pesado. Fueron los canadienses que en 1979, comenzaron a experimentar con bombas de cavidades progresivas en yacimientos de petróleos viscosos y con alto contenido de arena. Muy pronto, las fábricas comenzaron con importantes avances en términos de capacidad, presión de trabajo y tipos de elastómeros que algunas operadoras exigían.

A finales de la década del 80, se desarrollaron nuevas tecnologías en diseño y geometría de PCP's. A principios de los años 90, empezó a aplicarse la geometría multilóbulos para el área de producción de pozos.

Su llegada a Colombia fue en el año 1985 y el sistema PCP era conocido como Econolift por la marca que las proveían. Inicialmente se instalaron dos sistemas PCP, el primero en Tibú y el segundo en la Cira Infantas pero debido a la falta de conocimiento en esta tecnología no dieron resultado al no ser eficientes durante su operación.

Para 1998 se estiman instalados unos 25000 sistemas PCP activos en todo el mundo. La tecnología del PCP regresó a Colombia a mediados de 1999 realizándose instalaciones en los campos Mangos (Petrobras) y campo Piedras (Mercantile) y desde allí la aplicación de éste fue creciendo en gran variedad de campos de Colombia, entre estos se tienen: provincia, la Cira-Infantas, Casabe, San Francisco, Río Ceibas, Dina Terciarios (72 pozos), Santa Clara (13), Mangos, Piedras, Rubiales, Orito, Lizama, Guando, Purificación, Balay, Brisas (3), Toy (1), Lomalarga (1).

Hoy en día el bombeo por cavidades progresivas es destacado como sistema de levantamiento artificial, en recuperación de petróleos pesados.

Actualmente, existen diferentes modelos y tecnologías desarrolladas para ampliar el rango de aplicación en cuanto a volumen y levantamiento.

## **1.2 GENERALIDADES TECNICAS**

### **1.2.1 Descripción de la bomba**

El sistema PCP es un método de levantamiento artificial que se puede utilizar en la producción de fluidos muy viscosos y posee pocas partes móviles por lo que su mantenimiento es relativamente sencillo.

Un sistema BCP consta básicamente de un cabezal de accionamiento en superficie y una bomba de fondo compuesta de un rotor de acero, en forma helicoidal de paso simple y sección circular, que gira dentro de un estator de elastómero vulcanizado.

La operación de la bomba es sencilla; a medida que el rotor gira excéntricamente dentro del estator, se van formando cavidades selladas entre las superficies de ambos, para mover el fluido desde la entrada de la bomba hasta su salida.

El estator va en el fondo del pozo enroscado a la tubería de producción con un empaque no sellante en su parte superior. El diámetro de este empaque debe ser lo suficientemente grande como para permitir el paso de fluidos a la descarga de la bomba sin presentar restricción de ningún tipo, y lo suficientemente pequeño como para no permitir el paso libre de los acoples de la extensión del rotor.

El rotor va roscado en las varillas por medio del niple espaciador o intermedio, las varillas son las que transmiten el movimiento desde la superficie hasta la cabeza del rotor. La geometría del conjunto es tal, que forma una serie de cavidades idénticas y separadas entre sí. Cuando el rotor gira en el interior del estator estas cavidades se desplazan axialmente desde el fondo del estator hasta la descarga generando de esta manera el bombeo por cavidades progresivas. Debido a que las cavidades están hidráulicamente selladas entre sí, el tipo de bombeo es de desplazamiento positivo.

La instalación de superficie está compuesta por un cabezal de rotación, que está conformado, por el motor y el sistema de transmisión de potencia, movimiento y frenado. Estos sistemas proporcionan la potencia necesaria para poner en funcionamiento a la PCP.

Otro elemento importante en este tipo de instalaciones es el sistema de anclaje, ubicado en el fondo del pozo, que debe impedir el movimiento rotativo del equipo ya que, de lo contrario, no existirá acción de bombeo. En vista de esto, debe conocerse la torsión máxima que puede soportar este mecanismo a fin de evitar daños innecesarios y mala operación del sistema.

### **1.2.2 Ventajas**

El sistema PCP presenta las siguientes ventajas operativas:

- Producción de fluidos altamente viscosos (2000-500000) centipoises.

- La inversión de capital es del orden del 50% al 25% del de las unidades convencionales de bombeo, dependiendo del tamaño, debido a la simplicidad y a las pequeñas dimensiones del cabezal de accionamiento.
- Los costos operativos son también mucho más bajos. Se señalan ahorros de energía de hasta 60% al 75% comparado con unidades convencionales de otros tipos de sistemas de levantamiento artificial. Los costos de transporte son también mínimos, la unidad completa puede ser transportada en una camioneta.
- Opera eficientemente cuando hay baja presencia de arena en la producción, debido a la resiliencia del material del estator y al mecanismo de bombeo.
- La presencia de gas no bloquea la bomba, pero al haber gas libre durante la succión se disminuye parte de la capacidad de la bomba.
- Amplio rango de producción para cada modelo, rangos de velocidades recomendados desde 25 hasta 500 RPM, lo que da una relación de 20 a 1 en los caudales obtenidos. Este rango se puede obtener sin cambio de equipo.
- La ausencia de pulsaciones en la formación cercana al pozo generará menor producción de arena de yacimientos no consolidados. La producción de flujo constante hace más fácil la instrumentación.
- El esfuerzo constante en la sarta con movimientos mínimos disminuye el riesgo de fallas por fatiga y la posterior pesca de varillas de bombeo.
- Su pequeño tamaño y limitado uso de espacio en superficies, hacen que la unidad PCP sea perfectamente adecuada para locaciones con pozos múltiples y plataformas de producción costa fuera.
- Ausencia de válvulas que evitan bloqueo o desgaste de las partes móviles.

### **1.2.3 Limitaciones**

El sistema PCP posee las siguientes limitaciones:

- Resistencia a la temperatura de hasta 280°F o 138°C (máxima de 350°F o 178°C).
- Alta sensibilidad a los fluidos producidos (Los elastómeros pueden hincharse o deteriorarse con el contacto de ciertos fluidos por períodos prolongados de tiempo).
- Tendencia del estator a daño considerable cuando la bomba trabaja en seco por períodos de tiempo relativamente cortos (Cuando se obstruye la succión de la bomba, el equipo comienza a trabajar en seco).
- Desgaste por contacto entre las varillas y la tubería de producción en pozos direccionales y horizontales.
- Requieren la remoción de la tubería de producción para sustituir la bomba en caso que sea del tipo de instalación convencional (ya sea por falla, por adecuación o por cambio de sistema).
- Los sistemas están propensos a altas vibraciones en el caso de operar a altas velocidades, requiriendo el uso de anclas de tubería y estabilizadores o centralizadores de varilla de bombeo. Capacidad de desplazamiento real de hasta 2000 Bls/día (Máximo 4000 Bls/día).

## **1.3 TIPOS DE INSTALACIÓN**

### **1.3.1 Instalación Convencional.**

En este tipo de instalación el estator y el rotor son elementos totalmente independientes el uno del otro. El estator se baja en el pozo conectado a la

tubería de producción, debajo de el se conecta el niple de paro, anclas de torque, anclas de gas, etc; y sobre el se instala el niple de maniobra y finalmente la tubería de producción. En cuanto al rotor se conecta y se baja el pozo con la sarta de varillas.

En general esta bomba ofrece mayor capacidad volumétrica, no obstante, para el remplazo del estator se debe recuperar todos los componentes de producción.

### **1.3.2 Instalación Insertable.**

En este tipo de bombas, a pesar de que el estator y el rotor son elementos independientes, ambos son ensamblados de manera que ofrezcan un conjunto único el cuál se baja en el pozo con la sarta de varillas hasta conectarse en una zapata o niple de asentamiento instalada previamente en la tubería de producción.

Esta bomba tiene el inconveniente de ofrecer bajas tasas de producción (ya que su diámetro está limitado por el diámetro interno de la tubería de producción) pero ofrece la versatilidad de que para su remplazo no es necesario recuperar la tubería de producción con el consiguiente ahorro en tiempo, costos y producción diferida.

## **1.4 EQUIPO DE SUPERFICIE**

### **1.4.1 Variador de frecuencia.**

Este equipo varia la frecuencia de la corriente aplicada al motor eléctrico, al variar la frecuencia, varía la velocidad de rotación del motor ya que ambas son directamente proporcionales. En otras palabras, el variador rectifica la corriente

alterna requerida por el motor y la modula electrónicamente produciendo una señal de salida con frecuencia y voltaje diferente. Finalmente al variar la velocidad de la operación, varía la producción.<sup>1</sup>

**Figura 1.** Variador de frecuencia



Fuente: CURSO: Diseño, diagnóstico, optimización, instalación y análisis de fallas de sistemas PCP.

#### **1.4.2 Cabezal.**

El cabezal de rotación debe ser diseñado; para manejar las cargas axiales de las varillas, el rango de velocidad a la cual debe funcionar, la capacidad de frenado y la potencia necesaria.

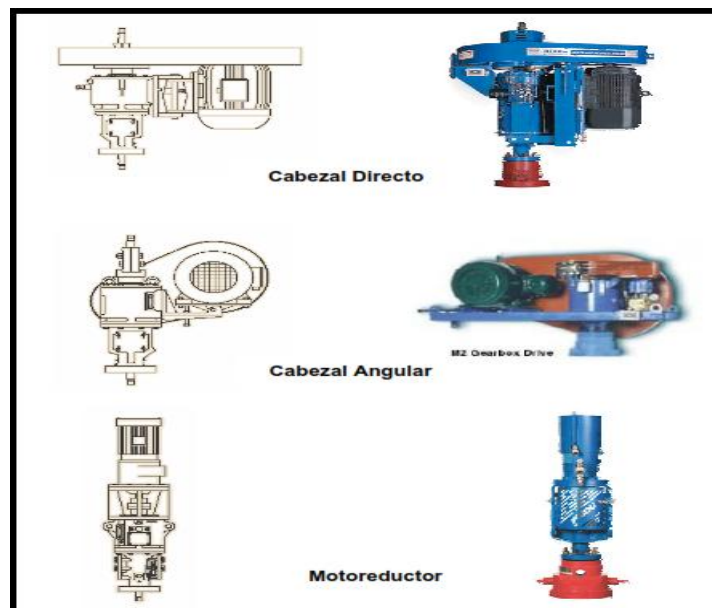
Es un equipo de accionamiento mecánico instalado en la superficie directamente sobre la cabeza del pozo. Consiste en un sistema de rodamientos o cojinetes que



soportan la carga axial del sistema, un sistema de frenado (mecánico o hidráulico) que puede estar integrado a la estructura del cabezal o ser un dispositivo externo. Un ensamblaje de instalación que incluye el sistema de empaque para evitar la filtración de fluidos a través de las conexiones de superficie. Además algunos cabezales incluyen un sistema de caja reductora accionado por engranajes mecánicos o poleas y correas.

La torsión se transfiere a la sarta de varillas mediante una mesa porta grampa. El movimiento dentro del eje hueco permite el ajuste vertical de la sarta de varillas de succión. El peso de la sarta de varillas se halla suspendido a una grampa, provisto de cuatro pernos. La barra se puede levantar a través del cabezal a fin de sacar el rotor del estator y lavar la bomba por circulación inversa (Flushing).<sup>1</sup>

**Figura 2.** Cabezal.



FUENTE: Catálogo Geremia-Weatherford<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chacín, N. (2003). *Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting*. El Tigre, Venezuela. pp. 39.

### 1.4.3 Motor.

Los sistemas PCP pueden ser adaptados tanto a motores eléctricos como a motores de combustión interna. De ellos el primero, es el más usado debido a su mayor eficiencia de operación y capacidad de automatización. Por el contrario, el uso de los motores de combustión interna (operados con gas natural, diesel o gasolina) está reservado a aquellas aplicaciones donde no se dispone de facilidades eléctricas o resulta muy costoso instalarlas. Por medio de un sistema de correas y poleas o por medio de líquido (aceite hidráulico) el motor, que como se mencionó anteriormente puede ser eléctrico o de combustión interna, le proporciona potencial al cabezal. Este cabezal a su vez transmite el movimiento a la sarta de varillas por medio de la barra lisa.<sup>1</sup>

**Figura 3.** Motor Eléctrico de superficie usado en el sistema PCP.



**Fuente:** CURSO: Diseño, diagnostico, optimización, instalación y análisis de fallas de sistemas PCP.

---

#### **1.4.4 Sistema de transmisión**

Es el dispositivo utilizado para transferir la energía desde la fuente primaria (motor eléctrico o de combustión interna) hasta el cabezal de rotación. Existen tres tipos de sistema de transmisión tradicionalmente utilizados:

- Sistema con poleas y correas
- Sistema de transmisión a engranajes
- Sistema de transmisión hidráulica

### **1.5 EQUIPO DE SUBSUELO**

#### **1.5.1 Tubería de producción**

La tubería de producción es la encargada de comunicar la bomba ubicada en el fondo del sistema con el cabezal y la línea de flujo del sistema. Si no hay ancla de torsión, se debe ajustar con un valor de torsión óptima, para prevenir desenrosque.

#### **1.5.2 Ancla antitorque**

Este dispositivo se encarga de evitar el desenrosque de la sarta al evitar el giro de los componentes de fondo del sistema PCP. Cuando se gira la sarta en sentido de las agujas del reloj (Viendo el movimiento en vista superior), se realiza la acción de girar la sarta también hacia la derecha, es decir, en el mismo sentido del desenrosque de la tubería de producción .

También existe un efecto adicional el cual es la vibración de las ondas armónicas en la columna que son ocasionadas por el giro de la hélice del rotor dentro del

estator. Con la combinación de los efectos anteriores puede originar que la tubería de producción se desenrosque.<sup>2</sup>

**Figura 4.** Ancla antitorque (Modelo Excalibre)



Fuente: Curso de sistemas PCP TDA SUPPLY & SERVICES, Ingeniero Andrés Correa.

---

<sup>2</sup> Hirschfeld, M. (2008). *Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas*. pp. 12.

### 1.5.3 Pin de paro

Permite dar un punto de referencia en la sarta para la ubicación del rotor dentro del estator, es decir hace tope al rotor al momento del espaciamiento. El pin de paro va roscado al extremo inferior del estator.

**Figura 5.** Vista superior de un pin de paro



**Fuente:** Curso de sistemas PCP TDA SUPPLY & SERVICES, Ingeniero Andrés Correa.

### 1.5.4 Niple Intermedio

Su utilización se hace necesaria ya que debido al movimiento excéntrico de la cabeza del rotor junto con el acople de unión a la primera varilla, describe en su trayectoria un círculo mayor que su propio diámetro. El diámetro que permitirá su movimiento es de  $D+2E$ , donde:

- “D” es el mayor de los diámetros, el de la cabeza del rotor o el diámetro externo del acople.
- “E” es la excentricidad de la bomba (Dato suministrado por el fabricante).

De esta manera, el niple de maniobra debe contar con un diámetro interno mayor que el resultado obtenido con la expresión  $D+2E$ . En cuanto a su longitud, debe ser suficiente para garantizar que la cabeza del rotor (En condiciones de operación) se encuentre en el interior de dicho niple. <sup>3</sup>

### 1.5.5 Estator PCP

Es una hélice doble-interna, moldeada a precisión y usualmente conectada a la tubería de producción. Esta constituido en su parte externa por una camisa de acero que esta revestida internamente por un elastómero. El paso del estator es el doble del paso de la hélice del rotor. <sup>4</sup>

**Figura 6.** Estator



**Fuente:** Curso de sistemas PCP TDA SUPPLY & SERVICES, Ingeniero Andrés Correa

<sup>3</sup> Chacín, N. (2003). *Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting*. El Tigre, Venezuela. pp. 29.

<sup>4</sup> *Ibid*, pp. 22.

### 1.5.6 Rotor

Está fabricado con acero de alta resistencia mecanizado con precisión y recubierto con una capa de material altamente resistente a la abrasión y extremadamente pulido para brindar sello hidráulico y disminuir la fricción. El rotor es la única parte móvil de la bomba y gira dentro del elemento que permanece estacionario (estator). El rotor tiene como función primordial el bombeo de fluido girando de modo excéntrico dentro del estator, creando cavidades que progresan en forma ascendente.

**Figura 7.** Rotor



**Fuente:** Curso de sistemas PCP TDA SUPPLY & SERVICES, Ingeniero Andrés Correa

## **1.5.7 Sarta de varillas**

### **1.5.7.1 Varilla convencional**

Es un conjunto de varillas de tamaño aproximado de 7/8" o 1" (los diámetros varían dependiendo de los diámetros de la sarta de producción) unidas por medio de acoples para formar la sarta, se introduce en el pozo y de esta forma se hace parte integral del sistema PCP. La sarta de varillas transmite el movimiento desde la superficie hasta el rotor de la bomba y están hechas de acero. Los diámetros están limitados por el diámetro interior de la tubería de producción, utilizándose diámetros reducidos y en consecuencia cuplas reducidas, de tal manera que no se raspe la tubería.

Características de las varillas empleadas en la sarta convencional:

- Juntas de 25' o 30'. Pony Rods de 2', 4', 6', 8', 10' y 12'.
- Conexión pin en los extremos
- Tamaños: 5/8" – 3/4" – 7/8" - 1" – 1-1/8" – 1-1/4"
- Se fabrican en distintos grados. Grados API: C, K y D.
- Se pueden fabricar en grados especiales no API: UHS-NR (Ultra High Strength Normalizada y revenida) y la varilla Premium de alta resistencia. Estos modelos son exclusivos de la empresa Tenaris.

### **1.5.7.2 Varilla continua**

Es un tipo de sarta de varillas que se caracteriza por tener solo dos conexiones (En el fondo y en el tope de la sarta). Este tipo de varilla es excelente por las ventajas que brinda en cuanto a maniobrabilidad y posibilidad de usar mayor diámetro de varillas en tubería de producción de slim-hole.

Otras ventajas de la varilla continua:



- Su uso aplica en pozos donde hay torque elevado.
- Incrementa el tiempo de servicio al tener solo dos conexiones, resulta en una disminución dramática de fallas de los acoples y los pines.
- Reduce costos de servicio al necesitar menos personal para correr este tipo de sarta.
- El servicio de varilla continua tanto de corrida como de sacada, se puede llevar a cabo a una velocidad de 100 ft/min lo que implica menos tiempo al prestar el servicio comparado con el tiempo que consume un servicio de varilla convencional, el cual es menor a 30 ft/min.
- Al no tener conexiones (acoples), hay pocas restricciones al flujo al realizar el levantamiento del fluido.

**Figura 8.** Sarta de varilla continua en carrete, campo Casabe



**Fuente:** Los autores

### 1.5.7.3 Varilla combinada

Como su nombre lo indica es un tipo de varilla que consta tanto de varilla convencional como de varilla continua. Esta configuración especial de varilla depende del diseño que se haga para cada pozo, las condiciones del pozo (fluidos corrosivos, presencia de scale, dog-leg, etc) y la configuración inicial de sarta que se tenga en el pozo. Por ejemplo en operaciones donde se ve afectada la varilla convencional se realizan cambios del tipo de sarta y se reemplaza dicha varilla por tramos de varilla continua.

### 1.5.8 Pony Rod

El Pony Rod se define como una varilla convencional corta que es utilizada para completar tramos de varilla convencional o de varilla continua y así alcanzar la profundidad deseada.

**Figura 9.** Pony Rod



**Fuente:** Nine ring

### 1.5.9 Cuello de ganso

Tramo de varilla convencional o continua de 50-100- 200-1000 ft de longitud que sirve para aislar el punto donde se arena el pozo, al mismo tiempo aísla el shear coupling (acople de esfuerzos) para lograr así recuperar la varilla continua.

### 1.5.10 Pin End

Rosca de alguno de los extremos de una sarta de varilla convencional.

### Figura 10.

Pin End. Instalaciones TDA.



**Fuente:** Los autores

### 1.5.11 Vástago (PR o BP)

El extremo superior de la sarta es completado con un vástago cromado que va enroscado a las varillas, este va empaquetado en superficie, por medio de un dispositivo de “prensa”.

El vástago puede ser de diferentes medidas. Algunas de las que se utilizan más comúnmente son de 1 ¼”; 1 ½” macizos, o de 48 mm en vástagos huecos; dependiendo de la sarta que se tenga en el pozo y del cabezal empleado en superficie. <sup>5</sup>

## 1.6 Accesorios

### 1.6.1 Centralizador

El centralizador es usado esencialmente para evitar roce de la sarta de varillas con la tubería de producción. Los centralizadores son útiles en pozos desviados o con situaciones donde se presente desviación severa.

**Figura 11.** Centralizador de material de plástico. Instalaciones TDA.



**Fuente:** Los autores.

---

<sup>5</sup> Hirschfeld, M. (2008). *Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas*. pp. 13.

### 1.6.2 Madrina o Trozo de Maniobras de 12 pies.

Es una varilla corta, la cual es muy importante instalarla inmediatamente por encima del rotor, en lugar de una varilla común (25 o 30) ft, cuando el sistema gira a una velocidad superior a 250 RPM. Debido a su longitud y al movimiento excéntrico del rotor que se transmite directamente a ella, la varilla instalada inmediatamente arriba de la madrina tiende a doblarse y rozar contra las paredes del inferior de la tubería de producción.

La madrina de 12 pies, al ser de la mitad de la longitud de las varillas, se dobla mucho menos o no se dobla, dependiendo de su diámetro y de la velocidad. Es por esta razón que se debe instalar un centralizador de 12 pies por encima de la cabeza del rotor.

### 1.6.3 Ancla de torsión

Al girar la sarta en el sentido de las agujas del reloj, o hacia la derecha (vista desde arriba) se realiza la acción de girar la columna también hacia la derecha, es decir hacia el sentido de desenrosque de los tubos de la tubería de producción. A esto se suman las vibraciones producidas en la columna por las ondas armónicas ocasionadas por el giro de la hélice del rotor dentro del estator, vibraciones que son tanto mayores cuanto más profunda es la instalación de la bomba. La combinación de ambos efectos puede producir la desconexión y el posterior desprendimiento de la tubería de producción, el ancla de torsión evita este problema. Cuanto más la columna tiende al desenrosque, más se ajusta el ancla, la cual debe ir siempre instalada debajo del estator.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup>Hirschfeld, M. (2008). *Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas*. pp. 12.

#### **1.6.4 Niples de Asiento**

Son dispositivos tubulares insertados en la tubería de producción y comunes en el pozo a una determinada profundidad. Internamente son diseñados para alojar un dispositivo de cierre para controlar la producción asociada a los pozos.<sup>7</sup>

#### **1.6.5 Tubo filtro**

Se utiliza para evitar, (en el caso de rotura del estator con desprendimiento de elastómero), que trozos originados a partir de este desgarramiento puedan estar dentro del espacio anular entre la tubería de producción y el casing.

Una vez cambiada la instalación de fondo, estos pedazos de elastómero podrán ser recuperados con equipo especial y no permanecerán en el pozo donde se corre el peligro que sean succionados nuevamente por la bomba. La condición para la instalación del tubo filtro es que la suma de las áreas de los orificios sea igual o mayor a 6 veces el área de succión de la bomba, es decir seis veces el área del niple de paro.

#### **1.6.6 Shear Coupling (Acople de esfuerzos)**

Es un acople incorporado en una sarta de varilla continua o convencional y está diseñado para romperse cuando se somete a un esfuerzo determinado; se emplea principalmente para permitir la liberación de la sarta de varilla cuando se alcanza un valor de tensión determinado.

---

<sup>7</sup>Chacín, N. (2003). *Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting*. El Tigre, Venezuela. pp.32.

**Figura 12.** Shear Coupling, Instalaciones TDA



**Fuente:** Los autores

### 1.6.7 Subcoupling

Acople utilizado para realizar un cambio de diámetro cuando sea necesario en la configuración de la sarta de varilla o para poder unir la sarta con otra unidad del sistema.

**Figura 13.** Subcoupling de 1" a 7/8". Instalaciones de TDA.

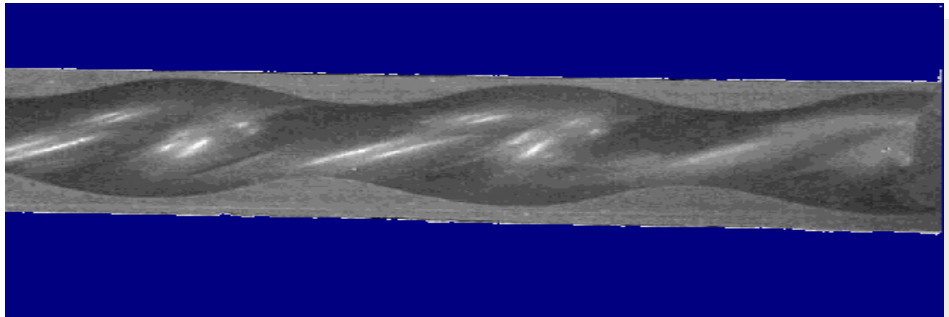


**Fuente:** Los autores

## 1.7 Elastómero

Químicamente es un polímero de alto peso molecular con la propiedad de deformación y recuperación elástica, es decir, resiliencia. Se consideran la base del sistema PCP en la que está moldeado el perfil de doble hélice del estator. La vida útil del sistema PCP depende en gran medida de su correcta determinación y su interferencia con el rotor.

**Figura 14.** Elastómero



Fuente: Curso de sistemas PCP TDA SUPPLY & SERVICES, Ingeniero Andrés Correa.

Para ver en mayor detalle los distintos tipos de elastómeros y los agentes físicos y químicos que los alteran, ver los anexos 1 y 2.

## 1.8 DISEÑO PARA SISTEMAS PCP

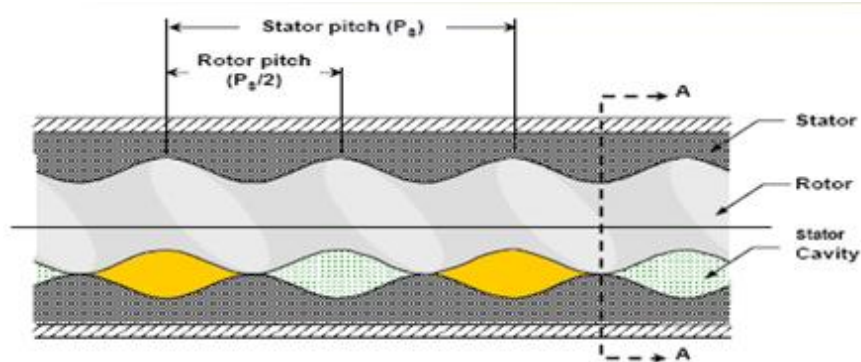
Para diseños de sistema PCP es importante establecer condiciones como flujograma (ver anexo 3), geometría de la bomba, principios básicos (Relación de radios, paso del estator, excentricidad y diámetro del rotor) y el levantamiento requerido.



## 1.8.2 Geometría de la bomba

La geometría de la bomba viene definida fundamentalmente por la relación de lóbulos entre rotor y estator, la cual debe obedecer las condiciones que hacen que se formen las cavidades cerradas: que el rotor tenga un lóbulo menos que el estator, y que el estator-rotor constituyan longitudinalmente dos engranajes.

**Figura 15.** Geometría del conjunto estator rotor.



**Fuente:** Curso de sistemas PCP TDA SUPPLY & SERVICES, Ingeniero Andrés Correa.

## 1.8.3 Principios básicos<sup>8</sup>

El desplazamiento del sistema PCP es constante y sin pulsaciones. Está en función del tamaño de las cavidades y de la velocidad de operación del sistema. El tamaño de las cavidades es dependiente de la geometría que se forma entre el estator y el rotor, la cual está regida por cuatro parámetros:

1. Relación de Radios
2. Paso del estator

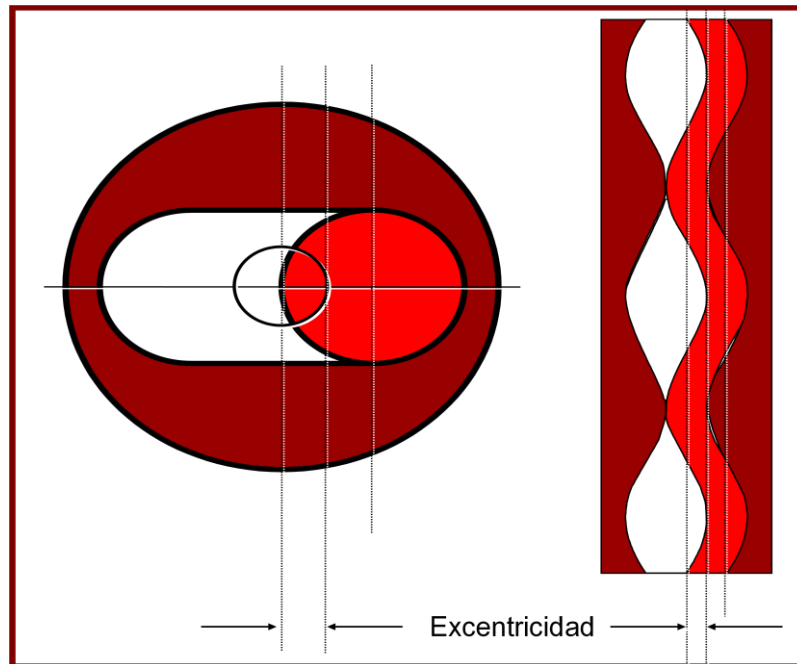
<sup>8</sup>Hirschfeld, M. (2008). *Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas*. pp. 37.

3. Excentricidad
4. Diámetro del rotor

### Excentricidad

Distancia entre el eje central del rotor y el estator. El movimiento del rotor dentro del estator es una combinación de dos movimientos: rotación concéntrica del rotor en su propio eje y rotación excéntrica del rotor alrededor del eje del estator. En una bomba de lóbulo simple, estos movimientos hacen la traslación hacia uno y otro lado del rotor a lo largo de la sección transversal del estator.

**Figura 16.** Excentricidad



Fuente: Curso de sistemas PCP TDA SUPPLY & SERVICES, Ingeniero Andrés Correa.

#### **1.8.4 Levantamiento neto requerido (presión)**

La capacidad de levantamiento neto está en función directa del número de cavidades, es decir, de las etapas de la bomba o líneas de sello, a mayor número de etapas, mayor capacidad de levantamiento.

Las líneas de sello rotor-estator pueden ser deformadas por la presión diferencial entre etapas, permitiendo el deslizamiento del fluido entre cavidades, este deslizamiento (afectará principalmente a la eficiencia volumétrica de la bomba) resulta en una pérdida o reducción del volumen total producido.

La eficiencia de levantamiento será función principalmente de:

- Número de etapas
- Dureza del elastómero
- Longitud del paso del rotor
- Interferencia entre rotor y estator

Cuando la línea de sello es deformada por la presión de la cavidad, se separa el estator del rotor permitiendo el deslizamiento hacia abajo del fluido de una cavidad a la inmediatamente inferior a muy altas velocidades.

#### **1.9 GENERALIDADES DEL CAMPO SANTA CLARA**

El campo Santa Clara está ubicado en el municipio de Palermo, pertenece a la cuenca superior del Magdalena, posee 27 pozos, de los cuales están en su mayor parte activos. De los 27 pozos 13 operan con PCP y el resto con bombeo mecánico. El API del crudo de Santa Clara está en el rango de 16-19.

La producción actual de Santa Clara es de 6921 Bls/día de líquidos, de los cuales el 16,7% es crudo (1162 Bls/día) y 83,3% es agua (5799 Bls/día) y 895.000 PCS de gas por día.



## **2. COMPILACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE DATOS DE FALLAS DE VARILLA CONVENCIONAL, CONTINUA Y COMBINADA.**

### **2.1 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

La información necesaria para desarrollar este proyecto está contenida en el historial de operaciones de los pozos con sistema PCP del campo Santa Clara, dicha información se maneja a modo de reportes en el software Open Wells, que entre otras cosas es el programa de mayor aceptación en las diferentes empresas tanto operadoras como de servicios. Para tomar datos del programa se debe tener acceso a la plataforma de Open Wells para la cual únicamente tienen permiso de acceder a dicha información las personas involucradas en la operación.

Debido a esto se buscó la colaboración tanto de los ingenieros de Producción de Ecopetrol como de los ingenieros encargados de los servicios prestados a dicha empresa y para poder acceder a esta información se realizó una carta de confidencialidad donde los autores del presente proyecto se comprometieron a darle un manejo responsable a los datos suministrados por los ingenieros.

De esta manera se agilizó la recopilación de la información con archivos de Excel que facilitaron la identificación de la población de pozos requerida para el estudio, el tipo de varillas y el resto de información vital para desarrollar el análisis del índice de fallas de varilla. En la siguiente figura se muestra una parte de los reportes consultados para desarrollar este proyecto.

**Figura 17.** Archivo formato Excel con reportes de operación de los 13 pozos funcionando con PCP en el campo Santa Clara.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1										
2										
3		Legal Well Name	Rig Name	event_cod	event_ob	date_repd	report_nc	comment	From	To
3178		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 2:00:00 PM	9/29/2011 3:00:00 PM
3179		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 4:00:00 PM	9/29/2011 5:00:00 PM
3180		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 6:30:00 PM	9/29/2011 8:30:00 PM
3181		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 11:00:00 AM	9/29/2011 2:00:00 PM
3182		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 8:30:00 PM	9/29/2011 9:30:00 PM
3183		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 6:00:00 AM	9/29/2011 11:00:00 AM
3184		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 3:00:00 PM	9/29/2011 4:00:00 PM
3185		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 9:30:00 PM	9/29/2011 10:00:00 PM
3186		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/29/2011	1	Se realiza ch	9/29/2011 5:00:00 PM	9/29/2011 6:30:00 PM
3187		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/30/2011	2	Se hizo emp	9/30/2011 12:30:00 PM	9/30/2011 2:00:00 PM
3188		SANTA CLARA-1	RSU	WSV	ROD STRING	9/30/2011	2	Se hizo emp	9/30/2011 10:30:00 AM	9/30/2011 12:30:00 PM

**Fuente:** Varisur

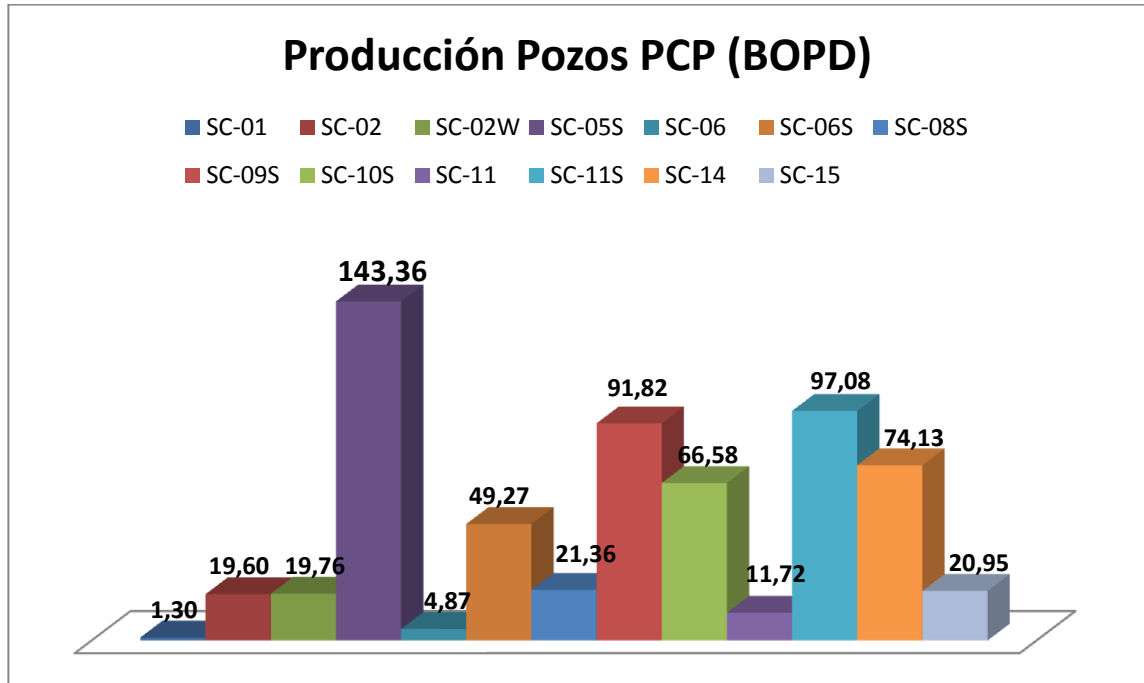
Partiendo de esta base de datos se procedió a extraer la información referente a la población de pozos que anteriormente se enunció que se iba a estudiar. A continuación se ilustrará un cuadro resumen con las condiciones generales de cada pozo, en términos de producción, BSW, GOR, etc. Estos datos son tomados

del historial de producción de Santa Clara y se reporta la última fecha registrada en el archivo:

**Tabla 1.** Datos de producción del campo Santa Clara

No	Pozo	Fecha	BFPD	%BSW	BOPD	BWPD	GAS	GOR
1	SC-01	1-Apr-13	24,40	94,60%	1,30	23,00	3,30	3262,30
2	SC-02	2-Apr-13	63,30	69%	19,60	43,70	3,20	161,10
3	SC-02W	4-Nov-12	70,56	72%	19,76	50,80	2,53	127,96
4	SC-05S	6-Nov-12	551,40	74%	143,36	408,04	2,74	19,10
5	SC-06	11-Apr-13	24,36	80,0%	4,87	19,49	1,52	311,81
6	SC-06S	22-Nov-12	86,43	43%	49,27	37,16	3,95	80,10
7	SC-08S	30-Nov-12	65,73	68%	21,36	44,37	1,77	82,76
8	SC-09S	20-Nov-12	966,57	91%	91,82	874,75	4,56	49,64
9	SC-10S	9-Apr-13	336,24	80,2%	66,58	269,66	2,22	33,28
10	SC-11	10-Jan-13	78,15	85,00%	11,72	66,43	4,23	360,93
11	SC-11S	23-Jan-13	669,54	85,50%	97,08	572,46	4,48	46,11
12	SC-14	27-Mar-13	314,10	76,40%	74,13	239,97	3,14	42,30
13	SC-15	21-Jan-13	32,48	36%	20,95	11,53	4,46	212,73

**Grafico 1.** Producción pozos PCP del campo Santa Clara.



El grafico y la tabla anterior ayudan a visualizar la importancia en términos de aporte de producción de los pozos que se van a estudiar debido a que en conjunto producen 621,8 BOPD lo que representa un porcentaje importante para la producción total del campo y justifica el estudio de las fallas de varillas que se presenten en dichos pozos para que en instalaciones y operaciones futuras se puedan mitigar riesgos y tomar acciones preventivas asociadas a las fallas de varilla y así en lo posible evitar dichas fallas para no afectar la producción del campo y disminuir el costo de extracción del barril de crudo.

Con la disminución del costo del barril de crudo se pueden mejorar los índices de rentabilidad a la hora de extraer el crudo de este campo, además de los beneficios económicos es rescatable el hecho de que al disminuir el número de servicios prestados por cada falla de varilla, el personal de la operación se expone en



menor proporción a los riesgos naturales que implican estas operaciones, siendo esto acorde a la política de producción de barriles limpios por parte de la empresa ECOPETROL.

### 3. Análisis Comparativo y técnico del índice de fallas de varilla asociadas a sistemas PCP del campo Santa Clara de la SOH, ECOPETROL SA

Tomando como punto de inicio en este trabajo los reportes de las operaciones, se da cabida al análisis de las fallas y afectaciones de las varillas reportadas, y para realizarlo de manera estructurada se organizó en primer lugar la información general de cada pozo para entender las características generales de estos y así mismo desarrollar el proyecto.

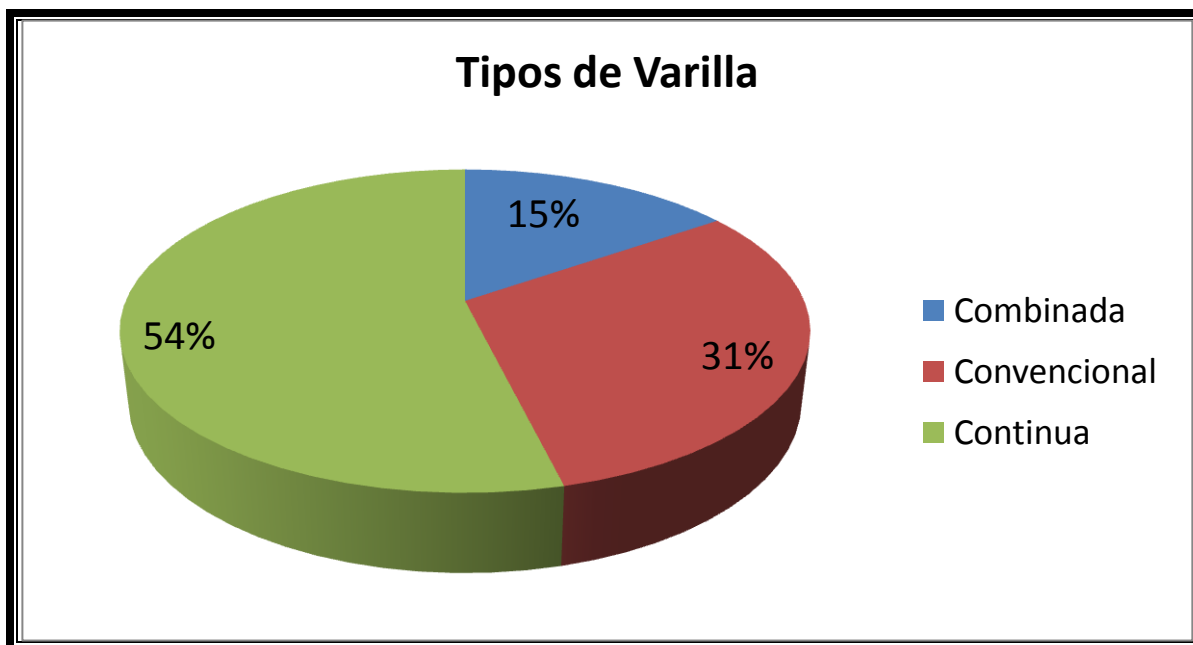
En las tablas concernientes a los pozos se encuentra la información tal como fue encontrada en los reportes; los cuales evidencian errores de redacción y ortografía. Esta peculiaridad es causada por el personal encargado a la hora de generar los reportes. En este primer cuadro se encuentra el nombre del pozo, el tipo de varilla y el diámetro de las varillas.

**Tabla 2.** Tipo y diámetro de las varillas.

TIPO Y DIAMETRO DE VARILLAS		
POZO	TIPO DE VARILLA	DIAMETRO (PULGADAS)
1	Combinada	7/8
2	Convencional	1
2W	Convencional	3/4
5S	Continua	7/8
6	Convencional	7/8
6S	Continua	7/8
8S	Combinada	7/8
9S	Continua	7/8
10S	Continua	1
11	Convencional	7/8
11S	Continua	7/8
14	Continua	7/8
15	Continua	1

Se encontró que la varilla continua es el tipo de varilla que más se usa en los pozos de PCP de Santa Clara, correspondiéndole un 54 %. Le siguen en orden la convencional y la combinada con 31 y 15 % respectivamente.

**Gráfico 2.** Porcentajes del tipo de Varilla para el campo Santa Clara



A continuación empleando una tabla resumen para cada pozo se busca identificar de manera general las afectaciones evidenciadas en los reportes, cada afectación esta agrupada por casos, los cuales son numerados en la primera columna de cada tabla correspondiente a cada pozo.

Con respecto a los eventos de falla de las varillas que están presentes en la cuarta columna de las tablas de cada pozo, se va a realizar más adelante un análisis enfocado exclusivamente a dichos eventos en el numeral 3.2 del presente

proyecto y a partir de los resultados plasmados en este numeral se calculará el índice de falla. Esto quiere decir que la primera parte del análisis contenida en el numeral 3.1, se dirige a la quinta columna de cada tabla que corresponde a las afectaciones. Cabe aclarar que en este estudio cuando se habla de la afectación a la varilla se incluyen también los componentes de estas. Estos componentes son los couplings, centralizadores, pony rod, cuello de ganso y shear coupling.

### SANTA CLARA 01

**Tabla 3.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-01

SANTA CLARA 01				
#	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1.	03/03/2010	Combinada	Tubing Damage	Couplings de 7/8" con afectación por CO2. Sarta (coiled sucker rod 7/8") y cuello de ganso (7/8") afectados en forma generalizada por corrosión de CO2.
2.	12/29/2010	Combinada	Tubing Integrity Test	Dobles y desgaste a 500' de 0.8125. Se nota corrosión excesiva en shear coupling.
3.	09/29/2011	Combinada	Rod String Failure	Varilla pro rod 960 M partida. Durante pulling de varilla se encuentra dobles pronunciado a 460'. Presencia de corrosión a 820' hasta el shear coupling y el cuello de ganso

En forma general y reuniendo toda la información de la tabla, en el pozo Santa Clara 1 se aprecia que la corrosión es la principal causa de la afectación de falla de varilla. Con respecto a los 3 casos que se presentaron en este pozo se

encuentra que en su totalidad son fallas asociadas a la corrosión. Existe un caso que además de la corrosión se presentó desgaste en la varilla.

Siendo este un pozo que trabaja con varilla combinada, se observa que en los casos ocurridos en el año 2010, tanto los acoples de varilla convencional y la varilla continua son afectados por la corrosión. Este efecto deja claro que la corrosión está asociada a los fluidos producidos, en este caso el fluido que hace de agente corrosivo es el CO<sub>2</sub>, el cual también puede afectar a toda la sarta.

En el año 2011 se presenta un caso donde se encuentra varilla partida, al realizar el pulling de varilla se encontraron dos variables que causaron que la varilla fallara. La primera de ellas se encontró a 460 ft durante el pulling (sacar varilla del pozo) y en este primer caso se encontró doblez pronunciado de la varilla, la segunda involucra presencia de corrosión a una profundidad de 820 ft y en la que se ven afectados el shear coupling y el cuello de gancho.

## SANTA CLARA 02

**Tabla 4.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-02

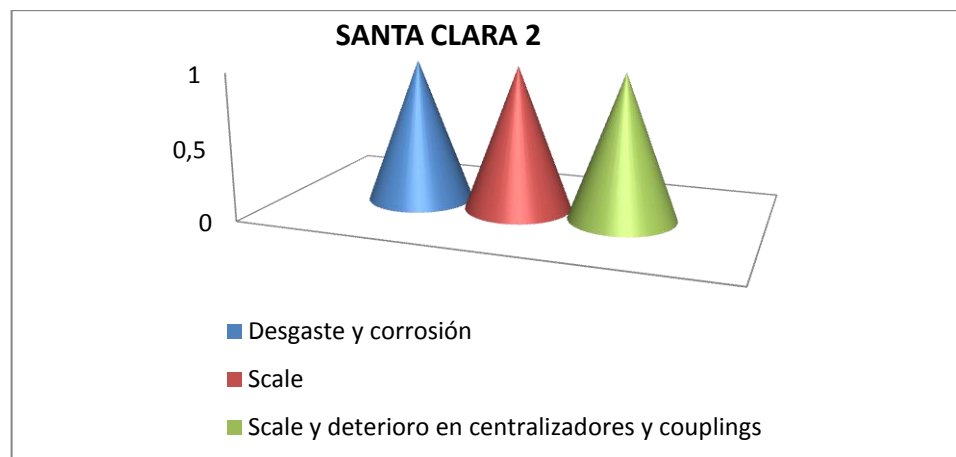
SANTA CLARA 02				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1.	05/20/2007	Convencional	Production Maintance	Se presentan 5 varillas de 1" con desgaste en el cuerpo y 20 coupling con desgaste y corrosión.
2.	09/08/2010	Convencional	PCP FAILURE	Las varillas y algunos coupling salen un poco recubiertos de scale, se recomienda cambiar 29 coupling de 1".
3.	06/24/2011	Convencional	Tubing Damage	Quebrando sarta de varilla de 1" x 25 ft centralizada una a una inspeccionando, retirando y seleccionando C/U de sus componentes por presencia de corrosión en la mayor parte de sus componentes, centralizadores PL- 5 y coupling con perfil de sello metal-metal deteriorado; también se evidencia Scale.

Para este pozo con sarta convencional, se presentan 3 casos donde se han visto afectadas las varillas, para cada uno se presentaron diferentes eventos los cuales son: PRODUCTION MAINTANCE (Mantenimiento de Producción), PCP FAILURE (Falla en PCP) y TUBING DAMAGE (Daño en tubería de Producción). Así como ocurrió en el pozo Santa Clara 1 la corrosión es la que más se presenta aunque para este pozo específico se tiene adicionalmente que las varillas fueron perjudicadas por presencia de scale tanto en sus componentes (centralizadores y acoples) como en el cuerpo de las mismas.

Para el año 2007 se presentó un caso en el que debido al desgaste, se ve afectado el cuerpo de 5 varillas y la corrosión combinada con el desgaste generan problemas en 20 acoples, los cuales durante la operación son reemplazados. Una de las características de la varilla convencional es que con respecto a la corrosión, los acoples representan puntos críticos de concentración de agentes corrosivos.

En el 2010 las varillas y los acoples son afectados esta vez por presencia de scale, siendo necesario cambiar 29 acoples debido a este problema. Por último en el año 2011 se evidencia un caso en el que la combinación de corrosión, scale y deterioro de centralizadores y acoples afectan la sarta de varillas.

**Gráfico 3.** Afectaciones de las varillas para el pozo SC-02



## SANTA CLARA 2W

En los reportes correspondientes a este pozo no se evidencian fallas ni afectaciones en la sarta de varillas. Varios factores pueden influir para que esto se presente, entre ellos un diseño eficiente en el sistema PCP, que puede ser determinante para que no se presenten fallas. Otro factor inherente a este pozo se basa en la concentración de cloruros (Ver tabla 16) donde se aprecia que los fluidos de este pozo tienen la menor concentración de cloruros de los 13 pozos que tienen instalado el sistema PCP.

## SANTA CLARA 05S

**Tabla 5.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-5S

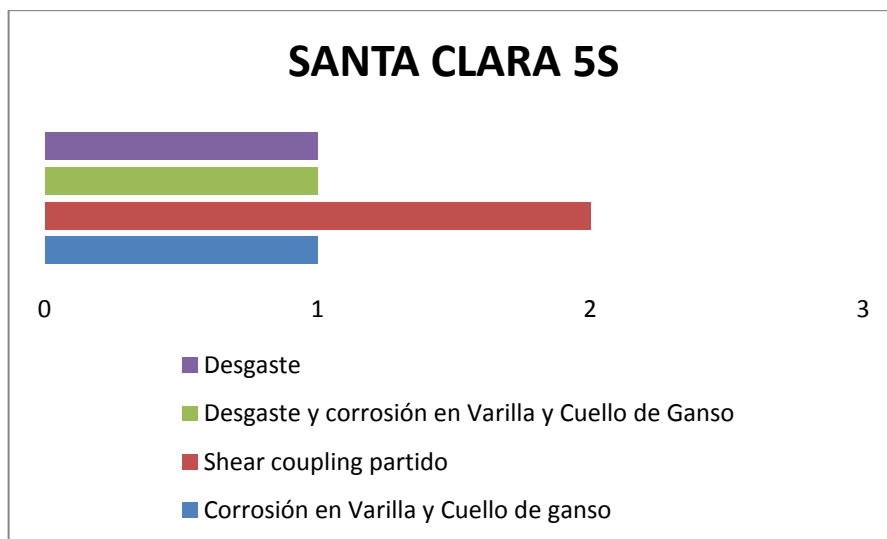
SANTA CLARA 05S				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1.	08/27/2008	Combinada	PCP FAILURE	Se remplazo el tramo de varilla desde 3700 FT @ 4312 FT por corrosión. Se remplazo todo el cuello de ganso de 100 FT por presentar corrosión
2.	01/26/2010	Combinada	ROD STRING FAILURE	Sale partido shear coupling, retirando shear coupling y calibrando.
3.	10/11/2011	Combinada	ROD STRING FAILURE	Saco de la sarta cuello de ganso de 100' y 125' de varilla continua que se encontraban con desgaste y corrosión
4.	11/20/2012	Combinada	ROD PUMP FAILURE	Realizó el Corte de 25 ft de Varilla por debajo del Punto de Ruptura y 17 ft por encima ya que se encontraban con desgaste y Torcidos .
5.	04/30/2013	Combinada	ROD STRING FAILURE	Sacó 4057 sarta de corod de 7/8" ser 4, calibrando cada 100 ft hasta encontrar shear coupling de 7/8" SH roto. Punto de rotura @ 4167 ft.

Para el pozo Santa Clara 5S de varilla combinada existen 5 casos que implican condiciones de desgaste, corrosión, y algunos componentes de la sarta como el

Shear Coupling y el Cuello de ganso que resultaron partidos y afectados por corrosión.

El primer caso del 2008 se caracteriza porque un tramo considerable de la sarta ubicado a una profundidad entre 3700 y 4312 ft es reemplazado por presencia de corrosión. Particularmente se observa en este caso que la totalidad del cuello de ganso es afectado por la corrosión, estas dos situaciones reafirman que la corrosión puede afectar cualquier parte de la sarta debido a que se origina a partir de los fluidos producidos en el pozo. En el año 2010 el shear coupling se parte y origina la falla, inmediatamente se procede a cambiar dicho componente. Análogamente a lo sucedido en el 2008 se encuentra un tramo de varilla afectado por corrosión, esta vez corresponde a 125 ft (no se especifica la profundidad) y el cuello de ganso es también afectado por la corrosión. En el 2012 se realiza corte de 25 ft de varilla al encontrarse doblados y en condiciones de desgaste. Por último en el 2013 el Shear Coupling cuando se sacó la sarta, sale partido a una profundidad de 4167 ft.

**Gráfico 4.** Afectaciones de las varillas para el pozo SC-5S





## SANTA CLARA 6

En los reportes de este pozo no existen afectaciones ni eventos en las varillas. Condiciones como óptimo diseño, eficiencia en el programa de inhibición de corrosión y además una baja concentración de cloruros en los fluidos producidos en el pozo (Ver tabla 16) son las que posiblemente propiciaron a que no se presentaran eventos ni afectaciones en las varillas de este pozo.

## SANTA CLARA 06S

**Tabla 6.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-6S

SANTA CLARA 06S				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1.	01/11/2011	Continua	PCP FAILURE	Varilla partida con punto de rotura a superficie 1010' de varilla corod a una profundidad de 1056'.
2.	05/22/2012	Continua	ROD PUMP FAILURE	Salió Partida la Varilla Continua de 7/8 a 540 ft del Pin Superior. Profundidad de Ruptura 628 ft.

En el pozo Santa Clara 6S que posee varilla continua, se presentaron únicamente dos casos, uno en el 2011 y el otro en el 2012. En la primera fecha la varilla se parte a una profundidad de 1010 ft. Por último en el 2012 la varilla presenta ruptura a 628 ft.

## SANTA CLARA 8S

**Tabla 7.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-8S.

SANTA CLARA 08S				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1.	08/02/2011	Continua	PRESSURE SURVEY	Sacando sarta de varilla continua desde 2731 ft. La varilla salió con un desgaste mayor de 5%.

En el caso del pozo Santa Clara 8S, no se presentan eventos de falla de varilla continua. El único caso y la única afectación encontrada se hizo presente en un servicio de PRESSURE SURVEY donde al sacar la varilla continua se encontró desgaste mayor al 5%, el tener un desgaste mayor al 5% representa una alerta debido a que pronto la varilla puede sufrir daño por esfuerzo; si el desgaste es mayor al 7-8% se recomienda cambiar el tramo de varilla afectado.

## SANTA CLARA 9S

**Tabla 8.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-9S.

SANTA CLARA 09S				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1.	04/27/2010	Continua	ROD STRING FAILURE	Realizó el pulling de la sarta. Del tramo partido salen 753' de varilla continua de 7/8" cod rod ser 6, afectado por corrosión de CO <sub>2</sub> .

Para el pozo Santa Clara 9S se presenta un único evento de falla de varilla donde la corrosión por CO<sub>2</sub> vuelve a irrumpir en el desempeño de la varilla y la afectación de la varilla se aprecia en un tramo considerable de 753 ft. En el reporte no se especifica la profundidad de esta afectación.

## SANTA CLARA 10S

**Tabla 9.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-10S.

SANTA CLARA 10S				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1.	07/20/2010	Continua	PCP FAILURE	Inicio a sacar sarta de varilla continua calibrando cada 50', saliendo 500' con desgaste por corrosión (2350' a 2850'), 150' del cuello ganso, shear coupling también presentan corrosión considerable.
2.	07/23/2010	Continua	PCP FAILURE	Se realiza corte en tramos de 25' de la varilla que presento desgaste por corrosión incluyendo el cuello de ganso total 750'.

En el pozo 10S no hay eventos de falla de varilla, pero operacionalmente el evento se denomina: PCP FAILURE (Falla del sistema PCP).

Las dos afectaciones que se hacen presentes en este pozo son la corrosión por CO<sub>2</sub>, la cual originó desgaste en los dos casos, obligando así a hacer el corte de dicha varilla y el reemplazo de los tramos afectados por el desgaste originado a partir de la corrosión.

## SANTA CLARA 11

**Tabla 10.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-11.

SANTA CLARA 11				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1.	12/24/2010	Convencional	Tubing Damage	6 varillas presentan corrosión, 24 cuellos X corrosión y 6 centralizadores PL-5 con corrosión.

Para este pozo el evento presentado es: TUBING DAMAGE, al sacar la sarta de varillas la presencia de corrosión en 6 varillas y en los centralizadores se hace presente. En esta operación se reemplazan las 6 varillas y los centralizadores afectados.

### SANTA CLARA 11S

**Tabla 11.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-11S.

SANTA CLARA 11S				
#	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACIÓN
1.	06/04/2009	Continua	ROD PUMP FAILURE	Saco tramo superior de la sarta corod calibrando cada 100'ft salen 982' de varilla ser 4 de 7/8 la sarta presenta alto desgaste por corrosión od mínimo 0.6 @ 750ft. Salen 889 ft de varilla SER 4 de 7/8" y 100 ft de cuello de ganso. Este tramo de sarta y el cuello de ganso también presentan desgaste por corrosión
2.	12/15/2010	Continua	Tubing Leak	La varilla que sale de pozo se encuentra con desgaste y corrosión excesiva

El pozo Santa Clara 11S presentó un evento por falla de varilla en el año 2009, en este evento el desgaste en la sarta es originado por la corrosión. Para este mismo caso, al hacer pulling de varilla se encuentra que cuello de ganso también ha sido afectado por el desgaste, el cual se presenta gracias a la corrosión. El segundo caso es un evento de TUBING LEAK donde al sacar la varilla se evidencia

desgaste por corrosión excesiva. Nuevamente la corrosión se hace presente siendo la principal causa de las fallas de varilla.

### SANTA CLARA 14

**Tabla 12.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-14

SANTA CLARA 14				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACION
1	03/19/2009	Continua	ROD STRING FAILURE	Punto de ruptura 871'
2	03/15/2010	Continua	ROD STRING FAILURE	Punto de ruptura a 850'
3	09/13/2010	Continua	ROD STRING FAILURE	Saco sarta de varilla continua de 7/8" SER 4 a punto de pesca profundidad aproximada 944' (rotura por cuerpo @ 808 ft),
4	02/03/2011	Continua	ROD STRING FAILURE	Continuo pulling de sarta de varilla continua ser 4 calibrando cada 100', saliendo los últimos 600' con corrosión.
5	02/11/2011	Continua	ROD STRING FAILURE	Punto de ruptura a 2902' y 2957'
6	09/07/2011	Continua	ROD STRING FAILURE	Punto de ruptura a 856'
7	06/18/2012	Continua	ROD STRING FAILURE	Punto de ruptura a 857'
8	09/09/2012	Continua	ROD STRING FAILURE	Punto de ruptura a 839'

En el pozo Santa Clara 14 con varilla continua se presentan 8 casos que corresponden en su totalidad a eventos de falla de varilla. Este es el pozo más

problemático de los 13 en estudio, por esta razón se estudiará de manera más amplia en apartados siguientes de este proyecto.

## SANTA CLARA 15

**Tabla 13.** Fecha, tipo de varilla, evento y afectación del pozo SC-15

SANTA CLARA				
CASO	FECHA	VARILLA	EVENTO	AFECTACIÓN
1	06/16/2011	Continua	ROD STRING FAILURE	Pulling de varilla continua pro rod 960 M, saliendo partida en cuerpo a 1050'.

El pozo Santa Clara 15 presenta solo un evento de falla de varilla. Al realizar Pulling, se encuentra que la varilla sale partida al alcanzar los 1050' durante esta operación y se evidencia que la ruptura se presenta en el cuerpo de la varilla.

### 3.1 Análisis de las afectaciones de la sarta de varillas y sus componentes

Recurriendo a la Tabla # 2 donde se clasificaron las varillas por su diámetro y el tipo de varillas, y relacionando esta información con las afectaciones de las varillas se evidenció que el tipo de varillas que más presentó afectaciones fue la varilla continua donde se presentaron 21 afectaciones en 7 pozos, en segundo lugar la varilla combinada con 4 afectaciones en 2 pozos y la convencional solo presentó 4 afectaciones en 4 pozos.

Estos resultados no son absolutamente determinantes para decir que una varilla siempre se comportará mejor que una u otra, o que al tener menos afectaciones un tipo de varilla debe ser escogida en futuros diseños. El desempeño de estas

varillas está sujeto a las condiciones a que esté sometido el pozo, las cuales se describirán en otros apartados de este proyecto.

A continuación con ayuda de una tabla se representan los datos mencionados y se complementan estos datos con el grafico 7.

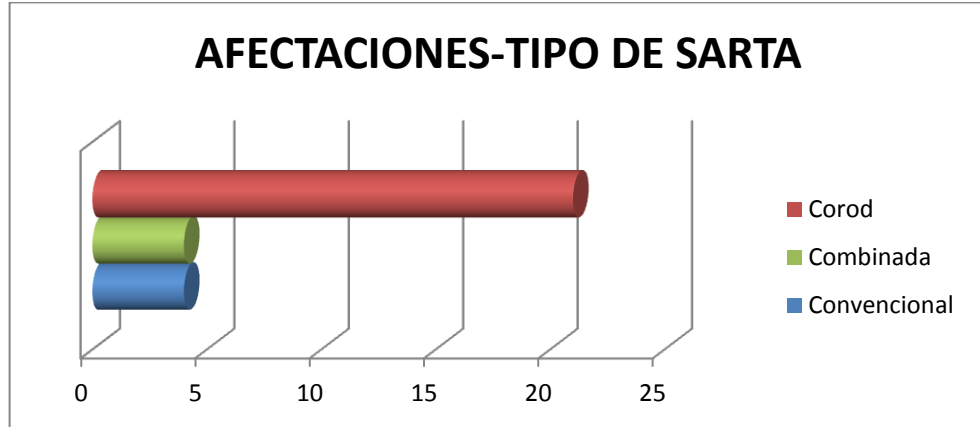
**Tabla 14.** Afectaciones en pozos Santa Clara.

AFECTACIONES POZOS SANTA CLARA					
<i>Varilla continua</i>		<i>Varilla combinada</i>		<i>Varilla Convencional</i>	
POZO	No. AFECTACION	POZO	No. AFECTACION	POZO	No. AFECTACION
5S	5	1	3	2	3
6S	2	8S	1	2W	0
9S	1			6	0
10S	2			11	1
11S	2				
14	8				
15	1				
<b>TOTAL</b>	<b>21</b>		<b>4</b>		<b>4</b>
<b>No. TOTAL AFECTACIONES POZOS SANTA CLARA</b>					<b>29</b>

Al comparar los datos de la tabla 14 con el grafico 2 donde se muestran los porcentajes que corresponden a cada tipo de varilla se puede apreciar que la varilla continua le corresponde un porcentaje de 54% y presenta el mayor numero de afectaciones con un total de 21, mientras que en la varilla combinada y la convencional se presentaron exactamente el mismo número de afectaciones con un total de 4 afectaciones para cada tipo de varilla. La varilla convencional representa el 31% de las varillas de los 13 pozos del campo en estudio y la varilla combinada un 15%.

Con el fin de visualizar mejor los resultados, el Grafico 7 se ilustra a continuación para observar cuantos casos de afectación de varilla se presentaron en relación a la configuración de la sarta.

**Gráfico 5.** Casos de afectaciones para cada configuración de sarta de varilla



La razón por la cual los tres tipos de varilla evidencian menos o más afectaciones es relativa a las condiciones del campo Santa Clara; ya que variables como el agente corrosivo, la geometría de los pozos y el mecanismo de depositación de Scale son las principales causas de que la varilla se desgaste, se corroa o se deposite scale en ella y estas variables son condiciones asociadas a dicho campo y no al tipo de varilla de cada pozo.

En total se presentaron 29 casos, los cuales tienen en cuenta afectación y falla en la sarta de varillas; entendiendo sarta de varillas como las varillas con sus componentes. Para realizar los gráficos y análisis correspondientes a los casos totales encontrados, se tomó la decisión de clasificarlos de acuerdo a las siguientes características:

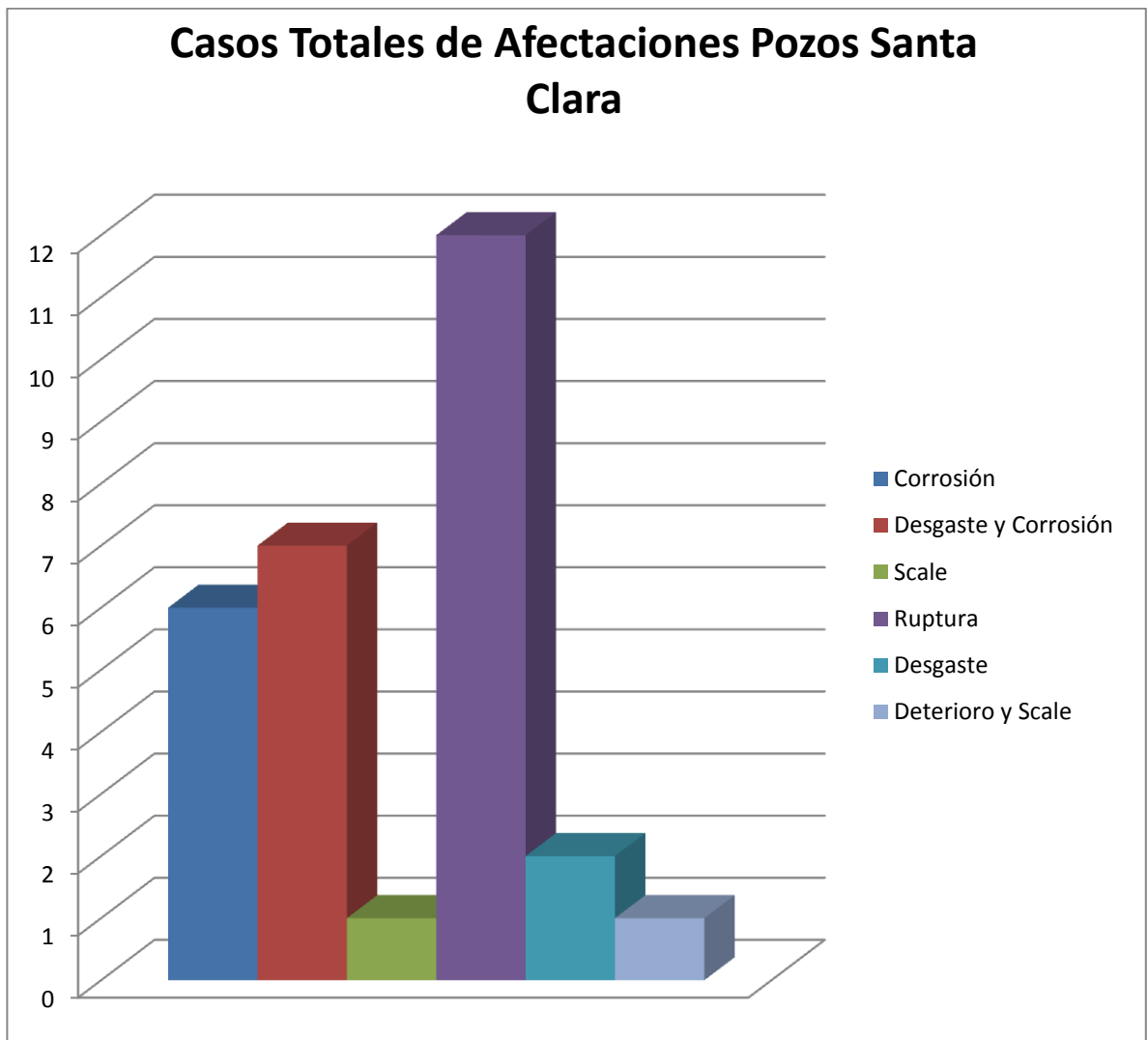
- Corrosión
- Desgaste y corrosión
- Presencia de scale.



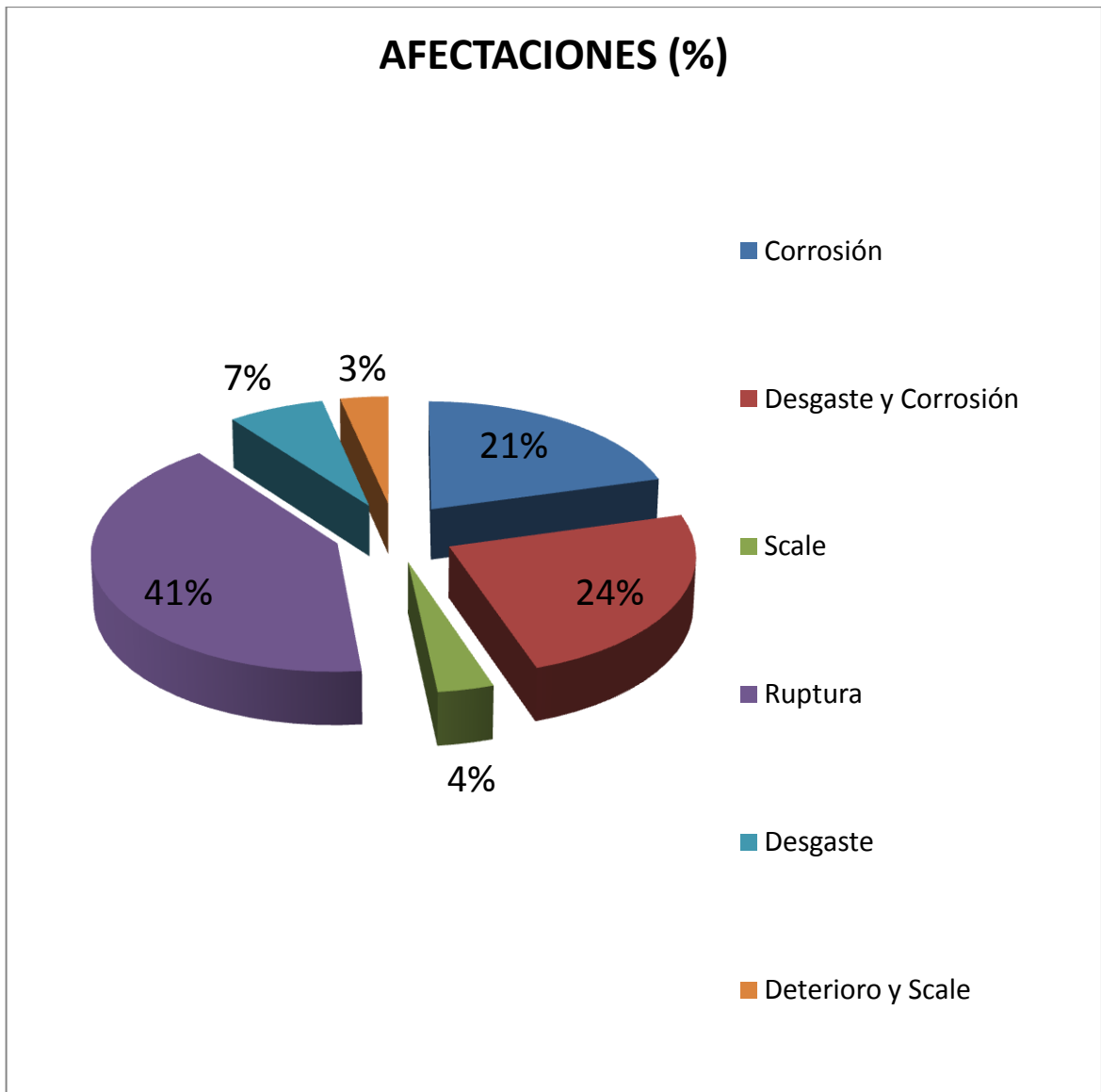
- Ruptura.
- Deterioro y scale.

A continuación se ilustran los casos con la ayuda de los gráficos 6 y 7:

**Gráfico 6.** Casos totales de los tipos de afectación.



**Gráfico 7. Porcentaje de Afectaciones**



De los gráficos se puede concluir que la ruptura, el desgaste y la corrosión son las variables que más afectan a las varillas de los pozos PCP del campo en estudio. La corrosión aunque puede ser incluida en la variable 'desgaste y corrosión' se clasificó como un ítem específico porque así fue reportado por el personal de la operación y por esta razón se analizó como una variable independiente para ser consistentes con los reportes. De esta manera la variable más representativa es la

ruptura de varilla que en los reportes se encontraba como “varilla partida”, el cual adicionalmente suministraba la profundidad a la que ocurría la ruptura. En menor proporción las tres variables que menos irrumpieron en el desempeño de las varillas fueron: el desgaste (sin presencia por corrosión), scale y la combinación de scale con deterioro en la sarta.

Posteriormente en este proyecto se analizarán las razones por las cuales se presentan rupturas apoyándonos en información proporcionada por los ingenieros de Ecopetrol, Varisur y TDA en las diferentes visitas realizadas, lectura de archivos y la teoría consultada acerca de fallas mecánicas de varillas y fallas por corrosión.

### **3.2 Análisis comparativo de los eventos de falla asociados a los pozos PCP del campo Santa Clara**

Los eventos presentados en los reportes son clasificados por el personal encargado de la operación de cada pozo, del estudio de los reportes se encontraron que los servicios eran prestados por compañías como TDA, Varisur, Weatherford, Parko Services entre otros. Los servicios que se encontraron en los reportes son variados, es importante aclarar que en los eventos hay uno en particular que se denomina PCP FAILURE o falla en PCP, que es una manera general de evidenciar fallas en el sistema de levantamiento sin especificar la parte del sistema que falló.

En visita realizada a TDA se le consultó a los ingenieros acerca de dicho evento y ellos aclararon que el proceso para catalogar este de manera general como “PCP FAILURE” empieza cuando personal de ECOPETROL evidencia que se presentan fenómenos en los pozos, por caída de producción o pérdida de torque, lo cual es un indicio que el sistema está fallando, pero no se tienen más datos acerca de la falla y por ende se efectúa dicha clasificación de forma general. Posterior a esto, al

hacer pulling de los componentes del sistema PCP como la sarta de varillas o el tubing de producción ya se puede determinar lo que ocasionó la falla en el sistema de levantamiento.

Adicional a los eventos PCP FAILURE y ROD PUMP FAILURE (o ROD STRING FAILURE) se encuentran también:

- TUBING DAMAGE (Daño de tubería de producción).
- TUBING INTEGRITY TEST (Prueba de Integridad de Tubería).
- PRESSURE SURVEY (Registro de Presión).
- TUBING LEAK (Fuga en tubería).
- PRODUCTION MAINTANCE (Mantenimiento de producción).

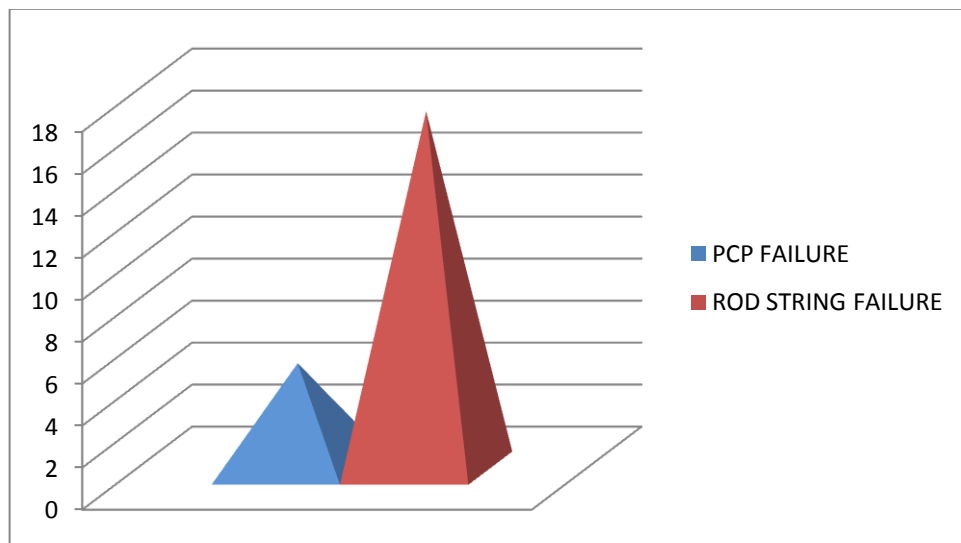
Para esta parte del proyecto solo se tendrán en cuenta PCP FAILURE Y ROD PUMP FAILURE ya que los otros eventos son independientes a las fallas específicas de la varilla y fueron tenidos en cuenta en las primeras tablas del análisis debido a que al sacar la varilla durante la prestación de estos servicios se observaban las afectaciones, esta fue la razón para que se realizara un análisis aislado de estas y otro análisis específico para los eventos.

De los 29 casos presentados en el campo Santa Clara en total hay 22 eventos de PCP FAILURE y ROD STRING FAILURE. De estos eventos 17 corresponden a ROD STRING FAILURE y el resto a PCP FAILURE (Ver tabla 16), A continuación se ilustran por medio de la tabla 15 la ocurrencia de los eventos para cada pozo y el número de eventos tanto de PCP FAILURE como de ROD STRING FAILURE con la ayuda del gráfico 8:

**Tabla 15.** Pozos y ocurrencia de evento por cada pozo.

POZOS SANTA CLARA	EVENTO
1	SI
2	SI
2W	NO
5S	SI
6	NO
6S	SI
8S	NO
9S	SI
10S	SI
11	NO
11S	SI
14	SI
15	SI

**Gráfico 8.** Eventos totales de falla de varilla



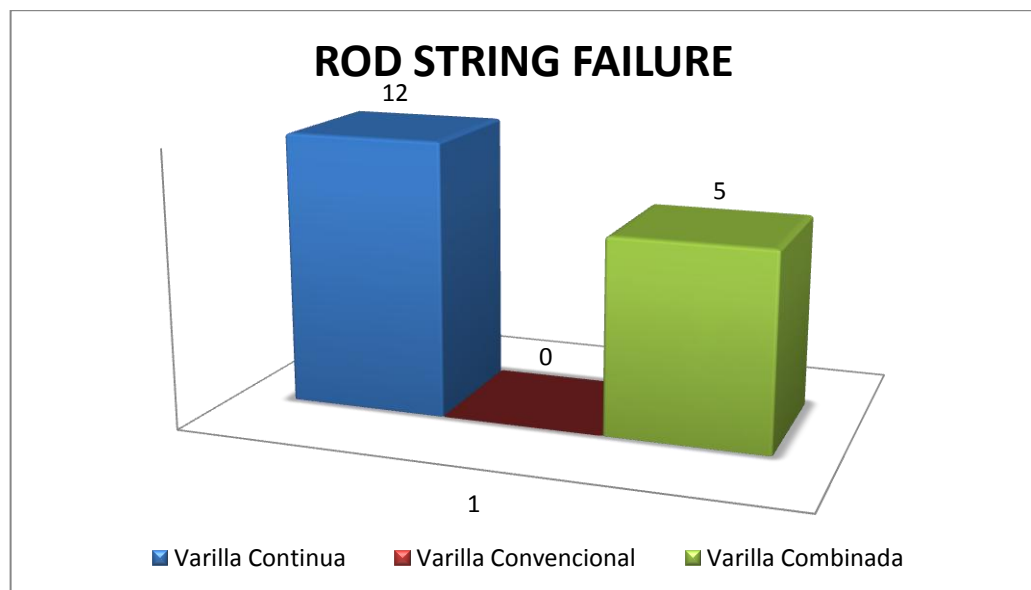
Teniendo en cuenta que los eventos asociados a PCP FAILURE son una clasificación del personal de la operación y que varía de uno a otro caso, puesto que las razones para este tipo específico de evento pueden involucrar o no una

falla de varilla. Para el análisis con graficas solo se consideraron los eventos ROD STRING FAILURE debido a que se tiene la seguridad de que la falla se da por la varilla y no por otro componente del sistema de levantamiento. También de manera resumida se muestra en la siguiente tabla los eventos clasificados para cada tipo de varilla:

**Tabla 16.** Tipo de sarta, tipo de evento y Número total de eventos por varilla.

TIPO DE SARTA	PCP FAILURE	ROD STRING FAILURE	No. TOTAL DE EVENTOS POR VARILLA
CONTINUA	3	12	15
CONVENCIONAL	1	0	1
COMBINADA	1	5	6
<b>EVENTOS TOTALES</b>	<b>5</b>	<b>17</b>	<b>22</b>

**Gráfico 9.** Evento de falla de varilla para cada tipo de sarta de varillas



Del gráfico se observa que la Varilla Convencional fue la que presentó mejor desempeño al no tener eventos por falla de varilla y de manera conjunta con los análisis anteriores esta varilla solo presentó 4 afectaciones que abarcan 'Corrosión', 'Desgaste y Corrosión' y 'Presencia de Scale'. La varilla continua y la varilla combinada son de esta manera las que más evidenciaron eventos por falla de varillas y son los dos tipos de configuración más problemáticas en los pozos PCP del campo Santa Clara, presentando la varilla continua 12 eventos y la combinada 5 eventos de ROD STRING FAILURE.

### **3.3 Índice de falla de las varillas a partir de los eventos de falla.**

El índice de falla corresponde al número de servicios prestados por pozos en un periodo de un año. Este es un indicador del desempeño de los sistemas de levantamiento en cada campo y la expectativa ideal de las empresas es que el valor tienda a 0.

En este proyecto el índice de falla se calcula específicamente a las varillas de PCP, para calcularlo se usan los datos reportados en los eventos de falla y no se calcula para las afectaciones.

Los datos necesarios para el cálculo del índice de falla se toman de la tabla 16 donde se contabilizaron 17 eventos de 'ROD STRING FAILURE', tomando como referencia las tablas 3 hasta la tabla 12 para identificar el año en el que se prestó el servicio y conociendo el número total de pozos del campo Santa Clara se calcula el índice de falla para un periodo de un año por pozo, en este proyecto el índice de falla no se calcula para el año 2013 debido a que el año no ha concluido.

Los resultados se muestran en la tabla 17:

**Tabla 17.** Índice de falla por varilla en los pozos con sistema PCP del campo Santa Clara.

POZO	1	2	2W	5S	6	6S	8S	9S	10S	11	11S	14	15
IF	1	0	0	1.3	0	1	0	1	0	0	1	2.7	1

De la tabla se puede identificar el comportamiento de las varillas de cada pozo, para este análisis se debe considerar que si el índice es mayor a 1 su desempeño no es el adecuado. Caso contrario, si el índice es menor a 1 se deduce que el desempeño de las varillas es aceptable.

Los índices de falla con valor 0 indican que no se prestaron servicios por falla de varilla, sin embargo como se mostró en las tablas alusivas a cada pozo, existen casos en los que hubo afectaciones en tramos de la varilla (corrosión, scale, desgaste, etc) pero el evento no corresponde a lo que se clasificó como ROD STRING FAILURE sino que se presentaron eventos diferentes como SURVEY PRESURE, PRODUCTION MAINTANCE, etc. Al realizar el servicio por dichos eventos, la sarta de varillas se extrae del pozo y por obligación se tiene que revisar todas las partes del SLA y es en ese momento donde se identifican las afectaciones y se reemplazan los tramos de varilla afectados.

### **3.4 Análisis de los factores que propician las afectaciones y fallas más comunes de las varillas de los Pozos PCP del Campo Santa Clara**

Con la ayuda de la información de los numerales anteriores donde de manera organizada se identificaron todas las afectaciones, eventos y fallas presentes alusivos a las varillas en los pozos con el sistema PCP, se desarrolla esta parte



del proyecto, la cual busca profundizar de manera breve las razones por las cuales estas afectaciones como ruptura, corrosión, desgaste, la combinación de estas o la presencia de scale están presentes en mayor proporción y causan problemas tanto operativos como económicos. En los siguientes numerales se desarrollarán dos de estos aspectos con el apoyo de información suministrada tanto por la operadora como las prestadoras de servicio con el fin de realizar un análisis más completo.

#### **3.4.1 Análisis de las condiciones corrosivas en los pozos con el sistema PCP del campo Santa Clara**

La corrosión en las varillas de bombeo se puede definir como el resultado destructor de una reacción electroquímica entre el acero empleado en la fabricación de las varillas y el medio ambiente de la operación al cual están sometidas. La corrosión es entonces la forma en que la naturaleza revierte un material de un estado de energía más alto (acero) a su condición básica (mineral natural), es decir, tal como fue hallado en la naturaleza.

En todos los pozos que se consideran corrosivos se encuentra presente el agua y la mayoría de veces contiene impurezas disueltas y gases. Dichos gases pueden ser el  $H_2S$  y el  $CO_2$  los cuales se encuentran en la mayoría de los pozos, son altamente solubles y se disuelven fácilmente en el agua lo que lleva a una reducción de su Ph.

La corrosión por  $CO_2$  se puede clasificar como corrosión ácida, la cual genera un adelgazamiento de manera uniforme. Cuando la corrosión por  $CO_2$  se hace presente la corrosión toma la forma de picaduras con fondos redondeados y paredes abruptas, y bordes de la picadura aguzados. La picadura no contendrá depósitos de incrustaciones. A continuación se muestran dos imágenes como ejemplo de los efectos de la corrosión por  $CO_2$  en las varillas:

**Figura 18.** Acople afectado por corrosión por CO<sub>2</sub>



**Figura 19.** Corrosión por CO<sub>2</sub>.



**Fuente:** Manual Norris

Otro factor importante que propicia condiciones de corrosión y que afecta el desempeño de las varillas es la presencia de cloruros, los cloruros vienen asociados con el agua de formación y a medida que aumenta su concentración en

el agua, aumenta la corrosividad de esta. La corrosión por cloruros tiende a picar uniformemente toda el área de la superficie de las varillas con picaduras superficiales, de fondo plano y de forma irregular. Las características de la forma de las picaduras incluyen, paredes empinadas y bordes aguzados de picaduras.

Una de las condiciones corrosivas del campo Santa Clara es la presencia de cloruros en los fluidos producidos en los pozos asociados el campo. A continuación se muestra una tabla resumida del análisis fisicoquímico de la composición de los fluidos donde se aprecian concentraciones altas de cloruros para los 13 pozos que funcionan con SLA PCP:

**Tabla 18.** Composición de fluidos del campo Santa Clara.

Pozo	BFPD	BOPD	BSW (%)	°API	Cloruros(ppm)
1	45	1,8	96,00	18,7	6200
2	700	91	87,00	17,80	7200
2W	80	25,6	68,00	17	1400
55	610	146,4	76,00	17,5	6400
6	25	5,25	79,00	17,3	2200
65	110	62,7	43,00	15	
85	85	18,7	78,00	17	4000
95	920	82,8	91,00	20	4800
105	370	66,6	82,00	17,5	4900
11	110	15,4	86,00	17,2	9400
115	790	110,6	86,00	20	5600
14	330	59,4	82,00	18,2	2200
15	50	30	40,00	14,5	

**Fuente.** Personal de TDA SUPPLY AND SERVICES.

De la tabla anterior se toman como referentes los 3 pozos con la mayor concentración de cloruros que son los pozos SC-02, SC-05S y el pozo SC-11 (señalados con color rojo). Al revisar la tabla # 4 correspondiente al pozo SC-02 se evidencia que se presentaron dos casos de corrosión en su sarta convencional. De igual manera al revisar las tablas de los pozos SC-05S y SC-11 también se encontró que existen casos de corrosión y esto es posible asociarlo con la alta concentración de cloruros presente en los fluidos producidos de los 3 pozos con mayor concentración de estas sales. De acuerdo a la tabla, los valores críticos de concentración de cloruros se aprecian al ser igual o superiores a 6400 ppm.

Con respecto a los demás pozos que no están señalados con rojo, se encontró por ejemplo que en el pozo 1 (Ver tabla 3) la corrosión por CO<sub>2</sub> más la acción de una concentración de cloruros muy cercana al valor crítico de 6400 ppm afectan en 3 ocasiones la sarta de varillas de este. En el pozo 2W, que tiene menor concentración de cloruros no presentó problemas de corrosión, ni de afectaciones y mucho menos de eventos de falla de varilla. En otros pozos como el 6 y el 14 existe una baja concentración de cloruros y de acuerdo a la información recopilada de cada de estos pozos en apartados anteriores se evidencia que no hay afectaciones por corrosión en ninguno de ellos y que las afectaciones y eventos en el pozo 14 son originadas por causas ajenas a las corrosión. Adicionalmente a esto, se aclara que los datos contenidos en esta tabla fueron suministrados por la empresa TDA y los espacios en blanco son propios de la tabla.

### **3.4.2 Análisis de las condiciones de desgaste y ruptura de las varillas en los pozos de SLA PCP en el Campo Santa Clara**

Como se identificó en los análisis de afectaciones y eventos de fallas de varillas el desgaste es una de las fallas más significativas. Con el desgaste de la varilla se produce pérdida de material a medida que transcurre el tiempo en que está en

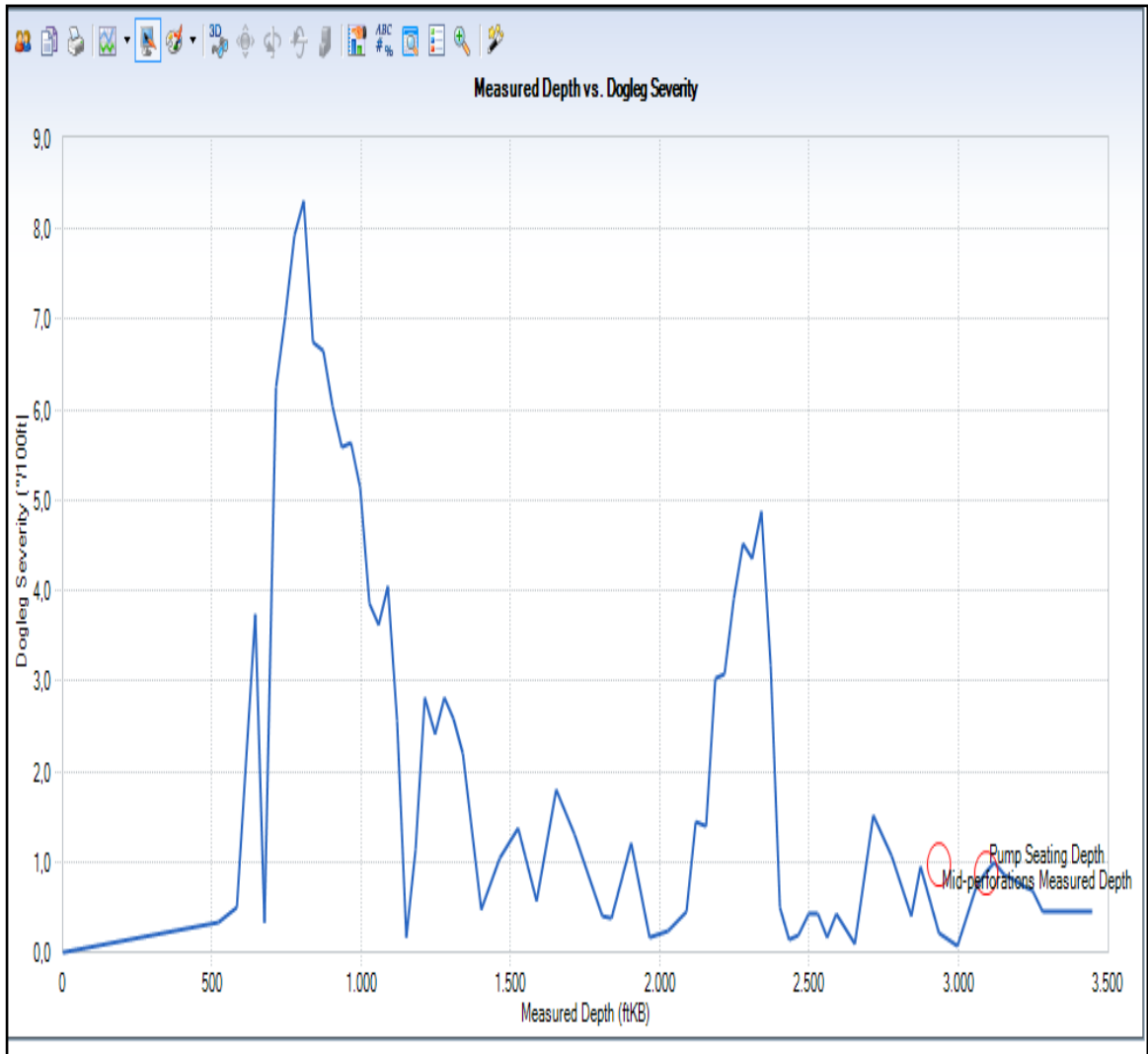
servicio el SLA. El desgaste propicia que las varillas tiendan a fallar por fatiga, donde pequeñas grietas por esfuerzo van creciendo bajo acción de esfuerzos cíclicos. La carga aplicada al levantar el fluido se distribuye casi igualmente sobre el área de sección transversal de la sarta de varilla y cualquier daño que reduzca el área de sección transversal, aumentará la carga o el esfuerzo en ese punto. Al progresar una grieta por fatiga, se reduce el área efectiva de la sección transversal de la varilla de bombeo, hasta que no queda metal suficiente para sostener la carga y la varilla se fractura en dos.

Ya sabiendo físicamente como es el mecanismo para que falle la varilla en condiciones de desgaste, se procede a analizar un pozo en particular en el campo Santa Clara el cual ha presentado múltiples eventos por falla de varilla.

Se analizará el pozo SC-14 quién ha exhibido múltiples eventos de falla de varilla por ruptura. En la visita realizada a las instalaciones de TDA los ingenieros comentaron que este pozo presenta tal comportamiento porque la geometría del pozo es muy brusca, evidenciada en un dog-leg cuyas unidades se dan en  $^{\circ}/100\text{ft}$  (Ver figura 20) muy alto que genera que la varilla esté sometida a esfuerzos excesivos cuando la sarta de varillas se recuesta con el tubing y así por fatiga la varilla se desgasta de una manera acelerada y por ende lleva a la ruptura de la misma.

A continuación se muestra la gráfica de dog-leg vs profundidad del pozo Santa Clara 14:

**Figura 20.** Grafico dog leg vs Profundidad, Pozo 14.



De la grafica anterior se nota que el valor de dog leg crítico se encuentra a una profundidad entre los 800 y 950 ft y al correlacionar este dato con los casos presentados en la tabla # 12 del pozo 14 se aprecia que de los 7 eventos de ruptura en el pozo 14, seis de estos eventos están dentro del rango en que el dog leg es severo. Para el caso siguiente el punto de ruptura se encuentra entre 2902' y 2957'.

#### **4. Análisis económico de las fallas de varilla**

En esta parte del proyecto se estudiarán las pérdidas económicas que se presentan por las afectaciones y los eventos ROD STRING FAILURE (ROD PUMP FAILURE). Es decir que se enfocará en el estudio de los costos de reemplazar varillas y considerando también los costos operativos asociados a los servicios prestados a Ecopetrol en el campo Santa Clara para reemplazar tanto las varillas afectadas como las varillas reportadas en eventos de ROD STRING FAILURE y además se tiene en cuenta la producción diferida que se presenta a partir de estos eventos.

De esta manera, existe una premisa con la cual se puede empezar este análisis, la cual consiste en revisar los Run Life de la varilla en los 13 pozos, que según expertos de Ecopetrol es estimado con un ideal de 5 años. Entendiendo el Run Life como la duración en servicio de uno de los componentes del SLA PCP desde su momento de instalación hasta su falla.

En la tabla 19, la cuarta columna se usa para especificar los pozos donde la varilla continúa en operación y no se ha presentado evento de falla; además en esta columna se presenta la fecha 18/07/2013 que corresponde al dato que se tomó como referencia para realizar el cálculo del Run Life, es decir que se toma el intervalo de tiempo para los pozos que no presentaron eventos de varilla desde que se instaló el sistema PCP hasta la fecha ya mencionada.

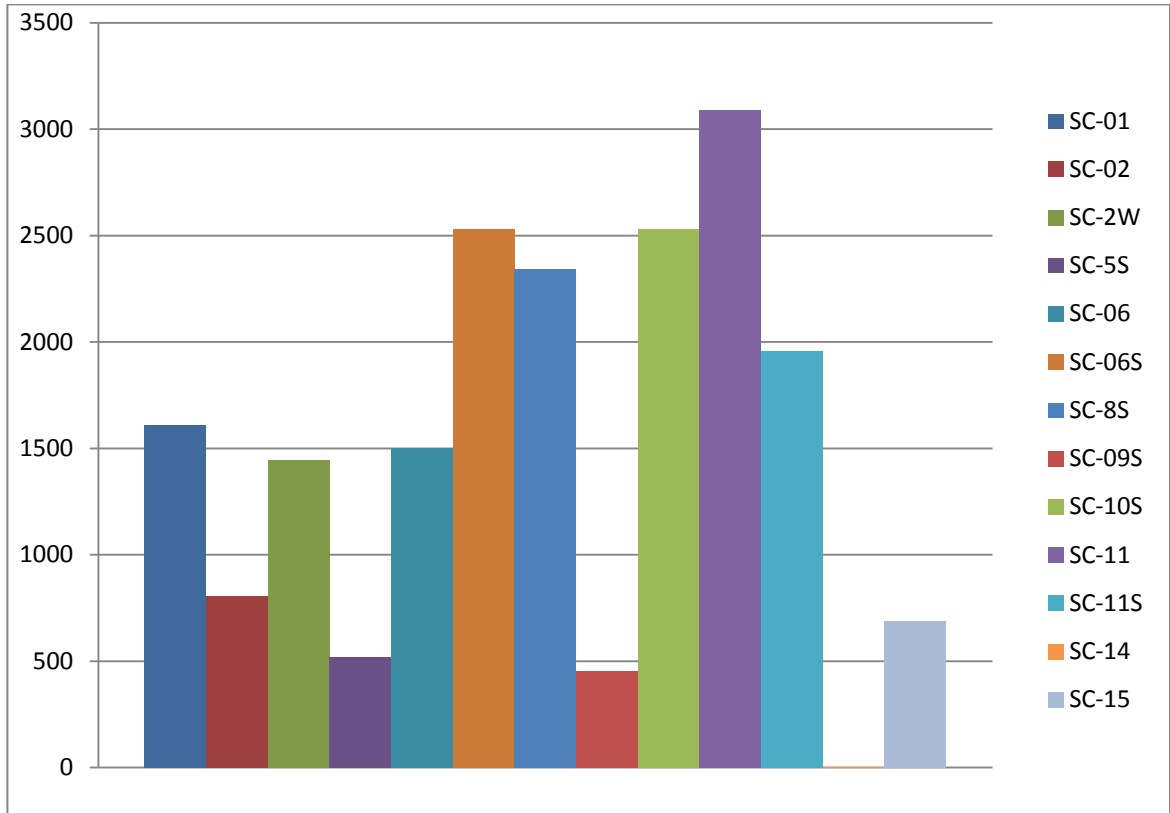
A continuación se muestran los Run Life de los pozos que presentaron eventos de falla resumidos en una tabla y un grafico que exhibe el comportamiento del Run Life para cada uno de los pozos:

**Tabla 19.** Datos de Run Life, fecha de cambio de SLA, fecha de evento de falla.

POZO	CAMBIO DE SLA	EVENTO DE FALLA DE VARILLA	VARILLA EN OPERACIÓN	RUN LIFE (Días)	RUN LIFE (AÑOS)
SC-01	25/04/2007	29/09/2011		1609	4,41
SC-02	25/04/2011		18/07/2013	808	2,21
SC-2W	27/07/2009		18/07/2013	1446	3,96
SC-05S	24/08/2008	26/01/2010		517	1,42
SC-06	30/05/2009		18/07/2013	1503	4,12
SC-06S	20/07/2005	22/05/2012		2532	6,94
SC-08S	20/02/2007		18/07/2013	2343	6,42
SC-09S	27/01/2009	27/04/2010		455	1,25
SC-10S	23/09/2006		18/07/2013	2530	6,93
SC-11	08/07/2005		18/07/2013	3092	8,47
SC-11S	03/02/2009		18/07/2013	1956	5,36
SC-14	17/03/2009	19/03/2009		2	0,01
SC-15	22/07/2009	16/06/2011		689	1,89



**Gráfico 10.** Run life para cada pozo



Como se dijo anteriormente, el estimado ideal de Run Life de varilla es de 5 años. En base a este estimado y revisando la tablas correspondientes de afectaciones y eventos de cada pozo se observa que los pozos SC-06S, SC-8S, SC-10S y SC-11S son los pozos que alcanzaron o superaron este tiempo ideal además el desempeño de las varillas de estos pozos fue optimo en términos de duración en servicio.

No es posible agrupar en una sola característica la razón por la cual estos pozos representaron el mejor desempeño en términos de duración en servicio porque los fluidos producidos tienen diferente BSW, API, concentración de fluidos corrosivos, fecha de instalación del sistema PCP, sarta de varillas de diferentes diámetros y

posiblemente diferente metalurgia. Por ejemplo el pozo 2 tiene una concentración de cloruros (7200 ppm) muy alta pero no presentó afectaciones ni eventos de falla; sin embargo se debe tener en cuenta que es un pozo que tuvo un cambio de SLA en el año 2011, es decir que es muy reciente y lo más probable es que cuando se le realice un servicio a este pozo se encontrará la varilla corroída por la evidente concentración alta de cloruros. De esta manera se deben considerar más variables a la hora de clasificar y entender las características que propician a que no se presenten eventos de varilla y un valor bajo de Run Life.

De la grafica anterior se aprecia que el pozo con el Run Life mayor fue del pozo SC-11 y relacionando este dato con la tabla # 10 concerniente a este pozo, se evidencia que no hubo evento de ROD STRING FAILURE y que se presentó una afectación por corrosión en un evento de Tubing Damage.

Según el gráfico 10, el pozo problema y analizando ahora la variable del Run Life es nuevamente el pozo 14 que particularmente a tan solo dos días de instalado el sistema PCP, presentó ruptura de varilla a una profundidad de 871 ft. Y de acuerdo con los demás valores de Run Life de los pozos, es el que se aleja del promedio de Run Life de los 13 pozos.

A continuación se estudiarán los costos que son generados por las fallas de las varillas en las operaciones de bombeo PCP del campo Santa Clara.

Estos costos varían teniendo en cuenta el tipo y el diámetro de la varilla. En la siguiente tabla se ven representados los precios de las varillas de acuerdo a su valor comercial en dólares. Se debe tener en cuenta que el costo unitario de varilla convencional que mide 25 ft de largo es de 185.5 US\$, el precio de la varilla continua de 7/8" es de 10.7 US\$/ft y el precio de la varilla continua de 1" es de 12 US\$/ft.

**Tabla 17.** Tipo de varilla, diámetro y precio comercial.

Pozo	TIPO DE VARILLA	DIAMETRO (Pulgadas)	PRECIO (US\$)
5S	Continua	7/8	10.7
6S			
9S			
14			
11S			
10S			
15		1	12
6	Convencional	7/8	185.5
11			
2		1	
2W			
1	Combinada	7/8	10.7

A continuación se calcula el costo del equipo utilizado en el pulling y running (bajar o meter varilla al pozo) de las varillas. Se tomó como referencia los costos manejados por la empresa Varisur, estos costos dependen fundamentalmente del tipo de varilla, si el procedimiento se efectúa con varilla continua el precio del servicio del equipo es de 313.11 US/hora, si la varilla es convencional el precio es de 460.49 US/hora. Teniendo en cuenta esta información se procede a calcular el costo del equipo para cada pozo de acuerdo a las horas que duró parada la etapa de producción.

**Tabla 21.** Costo del equipo.

<b>POZO</b>	<b>DURACIÓN DE PARADAS DEL POZO (HORAS)</b>	<b>COSTO DEL EQUIPO (US)</b>
1	27	12433.23
5S	162.8	50974.308
6S	28	8767.08
9S	76.5	23952.915
11S	69.5	21761.145
14	197	61682.67
15	86.5	27084.015
TOTAL		206655.363

Teniendo ya los valores correspondientes a los costos generados por la ruptura de varilla, los costos generados por el pulling y running de cada evento de falla y el costo del equipo, se calculó el costo total, que representa el valor total que Ecopetrol desembolsó a raíz de las fallas en las varillas.

## PRODUCCIÓN DIFERIDA

Se procede ahora a calcular la pérdida de producción causada por las fallas en las varillas, esto le representa a Ecopetrol dejar de percibir el valor de los barriles no producidos. Para tal procedimiento se tiene en cuenta las horas que duraron paradas las operaciones de producción, esto con el fin de calcular el volumen de crudo perdido.

Para hallar el estimado de la producción diferida se tomó el precio del barril del crudo correspondiente al año en el que se presentó la falla.

**Tabla 22.** Producción diferida.

POZO	FECHA EVENTO	BOPD	VOLUMEN DE CRUDO PERDIDO (bbbl)	PRECIO DEL CRUDO (U\$/bbbl)	PRODUCCIÓN DIFERIDA (U\$)
1	09/30/2011-17:00 a 10/01/2011-20:00	32	72	100.39	7228.08
5S	01/25/2010-06:00 a 01/30/2010-16:00	255.3	1446.7	77.12	111569.5
	10/10/2011-19:00 a 10/11/2011-06:30	144.3	69.1	99.92	6904.472
	11/19/2012-18:00 a 11/22/2012-02:00	143	278.97	101.17	28223.3949
	04/30/2013-07:30 a 04/30/2013-22:00	145	87.6	98.85	8659.26
6S	05/22/2012-08:30 a 05/23/2012-12:30	161.2	188.1	104.16	19592.496
09S	04/27/2010-15:00 a 04/30/2010-20:30	79.8	284.3	84.14	23921.002
11S	05/03/2009-08:00 a 05/06/2009-05:30	131	398.5	61.6	24547.6
14	03/19/2009-18:00 a 03/20/2009-17:00	109	104.5	48.68	5087.06
	03/14/2010-23:00 a 03/15/2010-09:00	128	42.7	79.3	3386.11
	09/13/2010-14:00 a 09/15/2010-09:30	81	209.3	76.11	15929.823
	02/02/2011-17:30 a 02/04/2011-07:30	78	117	97.73	11434.41
	02/11/2011-21:30 a 02/12/2011-20:00	64.8	60.75	92.66	5629.095
	09/07/2011-10:00 a 09/07/2011-16:00	53.6	22.3	100.83	2248.509
	05/18/2012-06:30 a 05/19/2012-22:00	59.5	97.9	90.73	8882.467
	09/09/2012-14:00 a 09/10/2012-06:30	36.1	24.8	106.32	2636.736
15	05/16/2011-18:00 a 05/18/2011-08:30	24.5	39.3	108.18	4251.474
<b>TOTAL</b>					<b>171333.909 US</b>

**Tabla 23.** Costos totales de las afectaciones y eventos de varillas

<b>COSTO TOTAL DE VARILLAS (US)</b>	<b>COSTO TOTAL OPERATIVO (US)</b>	<b>COSTO TOTAL ESTIMADO POR PRODUCCIÓN DIFERIDA (US)</b>	<b>COSTO DEL EQUIPO</b>	<b>VALOR TOTAL (US)</b>
<b>79,717.47</b>	<b>42877.9</b>	<b>171333.909</b>	<b>206655.363</b>	<b>500,584.462</b>

De la tabla 23, se deduce un considerado de los costos totales acarreados por las fallas de varillas en el sistema PCP del Campo Santa Clara. El valor total que se invierte para solventar las fallas asociadas a las varillas es una cifra considerable puesto que representa una merma en la rentabilidad de la empresa. Cabe resaltar que estos costos operativos pueden disminuirse mediante la implementación de programas de inhibición de corrosión o si es el caso con el mejoramiento de los diseños de pozo y la metalurgia. De esta manera se pretende reducir las pérdidas que generan las fallas de las varillas

## 5. CONCLUSIONES

- El 68% de los eventos de falla en los 13 pozos del campo Santa Clara se presentó en la varilla de tipo continua, el 32 % en la varilla combinada y la varilla de tipo convencional no presentó eventos.
- La ruptura con un 41%, el desgaste combinado con corrosión un 24 % y la corrosión con un 21% fueron los agentes de daño más comunes y más representativos en el desempeño de las varillas. Se pudo comprobar que estos eventos están directamente relacionados con la geometría de pozo y algunos agentes corrosivos específicos de los fluidos del campo Santa Clara.
- Un desgaste en la varilla mayor al 5 % indica que pronto puede sufrir daño por esfuerzo. Adicionalmente, los ingenieros de TDA sugieren que si los valores de desgaste alcanzan valores del 7% al 8% se debe cambiar la varilla.
- El pozo SC-14 es el mayor protagonista en cuanto a falla por ruptura debido a su geometría brusca. Este pozo es el que presentó más casos y eventos de falla de varilla. Este pozo también es el caso más crítico en cuanto al Run Life ya que en una ocasión su duración en servicio después de instalado el SLA solo fue de 2 días.
- El pozo SC-11 de varilla convencional fue el que tuvo mayor Run Life con una duración de 3092 días, que son equivalentes a 8,47 años en servicio.
- El pozo SC-8S con varilla combinada fue el pozo que más duró en servicio al emplear este tipo de configuración de sarta con una duración de 2343 días que equivalen a 6,42 años.

- La presencia de CO<sub>2</sub> y cloruros son las que generan problemas de corrosión en las varillas.
- Los costos totales llegan a un valor de US\$ 500,584.462.
- El pozo SC-14 fue el pozo que más pérdidas económicas le generó a la empresa porque sus costos operativos alcanzaron un valor de US\$ 21535.5.
- Los pozos SC-2W y SC-6 son los pozos que no representan pérdidas económicas en términos de costos operativos por falla o afectación de varilla.



## RECOMENDACIONES

- En cuanto a los reportes de Open Wells, se debe buscar que los encargados de la operación sean más claros a la hora de redactar los reportes de las operaciones realizadas en los diferentes pozos.
- Implementar o mejorar el programa de inyección de químicos para que se inhiban los procesos corrosivos generados por los cloruros y el CO<sub>2</sub> presentes en los fluidos producidos.
- Analizar la implementación de varillas con grados mayores para resistencia a la corrosión y de la misma forma buscar acoples de varilla con grados resistentes a la corrosión.
- Factores como la dureza, material y diámetro de la varilla deben ser analizados y contemplar la posibilidad de seleccionar un grado de varilla con capacidad de trabajar bajo las condiciones químicas agresivas a las que se someten los pozos. Sin pasar por alto que estos factores están sujetos a las decisiones que tome la empresa con respecto al valor estipulado para la compra de las varillas a utilizar.
- En las varillas de tipo convencional que presentaban repetitivamente problemas de abrasión-desgaste, se debe considerar reforzar la centralización del sistema o también realizar cambio a varilla continua para disminuir cargas de contacto sobre puntos localizados.
- Debido a que el pozo SC-14 presenta un alto número de afectaciones y eventos, es recomendable desde el punto de vista de ingeniería que se

planteen soluciones para evitar desgaste crítico de la sarta de varillas, siendo una opción centralizar toda la sarta.

- Analizar el desempeño de los pozos a partir de todas las variables analizadas en este proyecto (fluidos corrosivos, geometría de pozo, run life, etc.) que no presentaron afectaciones para compararlos con los pozos problema. También estudios complementarios pueden ahondar en estas variables y así investigar la forma de solucionar los problemas asociados a los pozos.

## BIBLIOGRAFIA

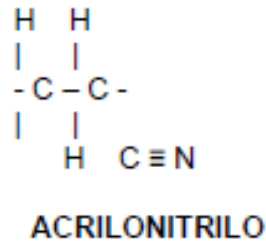
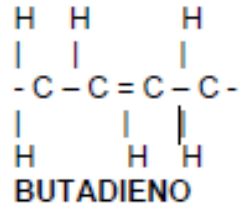
- Hirschfeldt Marcelo. Manual de Bombeo de cavidades Progresivas. 2008
- NorrisSeal Company. Análisis de las fallas de las Varillas de Bombeo.
- Weatherford. Progressing Cavity Pump Manual
- Netzsch. Manual de sistemas PCP.
- Correa, Andrés Eduardo. Curso básico de levantamiento artificial con bombas de cavidades progresivas pcp. 2011.
- NorrisSeal Company. Protegiendo sus inversiones-El cuidado y manejo de las Varillas de succión.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1 ELASTÓMEROS PARA PETRÓLEO

Los elastómeros que se emplean para el levantamiento de petróleo son los siguientes:

- ✚ Caucho NBR o base nitrílica (Nitrile Butadiene Rubber)
- ✚ Cadenas copolímeras de butadieno y acrilonitrilo (ACN)



### **Acrlinitrilo**

- El butadieno tiene doble enlace de carbono que favorece las reacciones químicas que permiten agregar aditivos que mejoran sus propiedades.
- Para la fabricación del elastómero, el proceso que se lleva a cabo es la vulcanización. Los aditivos son mezclados mecánicamente y luego se moldea y vulcaniza la mezcla para acelerar el proceso de formación de los enlaces.
- Se emplean más de una docena de aditivos en cada compuesto específico de caucho, tales como azufre que provee enlaces, catalizadores de vulcano, etc.

- Baja resistencia al H<sub>2</sub>S
- Oleofilos: Tienden a absorber petróleo

### **HNBR Nitrílico hidrogenado**

- ❖ Buena resistencia al H<sub>2</sub>S: El hidrogeno satura el triple enlace del acrilonitrilo.
- ❖ Muy buena resistencia a la temperatura
- ❖ Propiedades mecánicas medidas
- ❖ Baja resistencia a los aromáticos y al CO<sub>2</sub>

### **Fluorocarbono – fkm (viton)**

- Excelente resistencia a los aromáticos y CO<sub>2</sub>
- Excelente resistencia a la temperatura
- Buena resistencia al H<sub>2</sub>S
- Pobre resistencia a la abrasión
- Moldeable únicamente en bombas de paso largo

## ANEXO 2

### AGENTES QUÍMICOS Y FÍSICOS AGRESIVOS

Disolventes aromáticos.

- Cadenas de carbono  $C_{2n}H_{2n-6}$  cerradas no saturadas, que producen reacciones químicas con el caucho de nitrilo butadieno (NBR) y con otros disolventes como: Benceno, Tolueno, xileno, etc.
- Petróleos con más de 30 °API casi siempre contienen aromáticos.
- La agresividad de los aromáticos con el elastómero aumenta con la temperatura.
- Efecto: reblandecimiento e hinchamiento de la goma.

Bióxido de carbono  $CO_2$

- Se encuentra en muchos pozos en la fase gaseosa.
- Efecto: endurecimiento e hinchamiento de la goma.

Acido sulfhídrico  $H_2S$ .

- Ataca el enlace triple del acrilonitrilo.
- También ataca el enlace doble del butadieno.
- Efecto: enlaces cruzados que estrechan el elastómero, lo ponen quebradizo y lo rompen.

Agua.

- Todos los cauchos absorben agua y se hinchan a menor concentración de acrilonitrilo y  $C_4$  hay menor hinchamiento por agua.
- Todos los cauchos son oleófilos: al absorber petróleo los protege del agua.

- Se pueden bombear fluidos con el 99 % de Agua.

#### Gas Libre

- Todos los cauchos son permeables al gas.
- En paros de producción produce descompresión explosiva.
- En cauchos NBR a  $>$  % de ACN  $<$  permeabilidad del fluorocarbono (FKM) y Nitrílico hidrogenado (HNBR) y alta permeabilidad pero poca resistencia al CO<sub>2</sub> Libre.

#### Temperatura

- Aumenta la susceptibilidad a los ataques químicos.
- Disminuye en forma lineal las propiedades mecánicas.
- Aumenta en forma lineal el hinchamiento por absorción de líquidos.

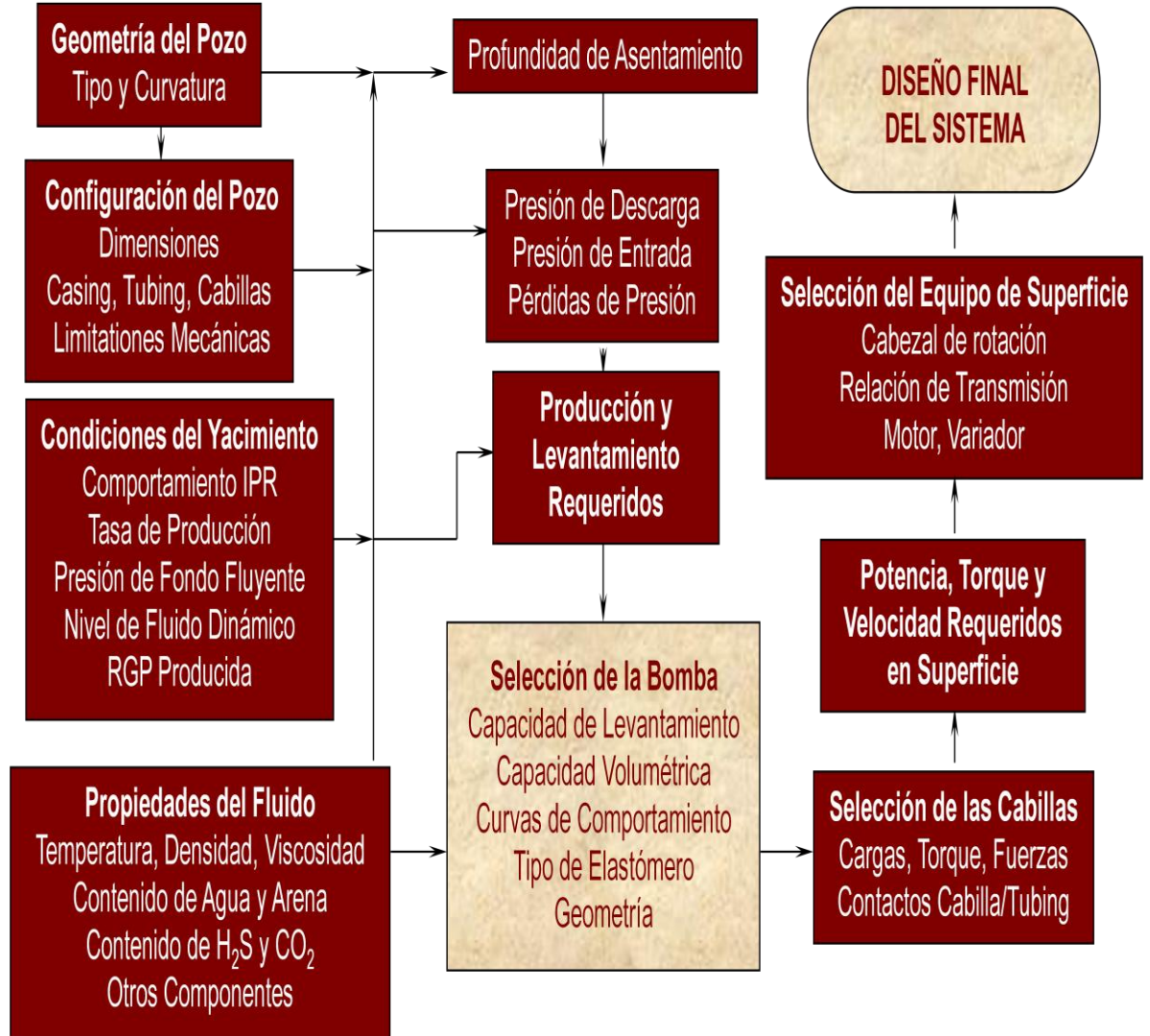
### **VARIACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ELASTÓMEROS**

Los elastómeros se pueden elongar, hinchar, variar su dureza y sufrir fatiga del material en condiciones de operación. A continuación se enuncian estas propiedades, las cuales influyen en la escogencia de ciertas partes, como por ejemplo la relación de hinchamiento, el número máximo de ciclos y el tipo de rotor a escoger:

- ✓ Hinchamiento.
- ✓ Elongación.
- ✓ Resistencia Tensil.
- ✓ Dureza.



**ANEXO 3**  
**FLUJOGRAMA PARA DISEÑO DE PCP**



Fuente: Curso de sistemas PCP TDA SUPPLY & SERVICES, Ingeniero Andrés Correa.

